

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
DE AUTOMAÇÃO E SISTEMAS**

SALVADOR FRANCISCO TIRLONI

**INSTRUMENTAÇÃO DE UMA FACA DE DESOSSA:
MEDIÇÃO DA FORÇA APLICADA E DOS MOVIMENTOS
REALIZADOS**

**FLORIANÓPOLIS – SC
2016**

Salvador Francisco Tirloni

**INSTRUMENTAÇÃO DE UMA FACA DE DESOSSA:
MEDIÇÃO DA FORÇA APLICADA E DOS MOVIMENTOS
REALIZADOS**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Automação e Sistemas para obtenção do grau de “Mestre em Engenharia de Automação e Sistemas”.

**Orientador: Prof. Dr. Nestor Ro-
queiro**

**FLORIANÓPOLIS – SC
2016**

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Tirloni, Salvador Francisco
INSTRUMENTAÇÃO DE UMA FACA DE DESOSSA: : MEDIÇÃO DA
FORÇA APLICADA E DOS MOVIMENTOS REALIZADOS / Salvador
Francisco Tirloni ; orientador, Nestor Roqueiro -
Florianópolis, SC, 2016.
135 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em
Engenharia de Automação e Sistemas.

Inclui referências

1. Engenharia de Automação e Sistemas. 2. Instrumentação.
3. Aquisição de dados. I. Roqueiro, Nestor. II.
Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós
Graduação em Engenharia de Automação e Sistemas. III. Título.

**INSTRUMENTAÇÃO DE UMA FACA DE DESOSSA:
MEDIÇÃO DA FORÇA APLICADA E DOS MOVIMENTOS
REALIZADOS**

Salvador Francisco Tirloni

Esta dissertação foi julgada aprovada para obtenção do grau de “Mestre em Engenharia de Automação e Sistemas” e aceita em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Automação e Sistemas.

Florianópolis, 16 de junho de 2016.

Prof. Nestor Roqueiro, Dr. Eng.
Orientador

Prof. Rômulo Silva de Oliveira, Dr. Eng.
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de
Automação e Sistemas

Banca Examinadora:

Prof. Nestor Roqueiro, Dr. Eng.
Presidente

Prof. Ana Regina de Aguiar Dutra, Dra. - Unisul/Florianópolis

Prof. Rodolfo César Costa Flesch, Dr. Eng. - UFSC/Florianópolis

Prof. Rodrigo de Souza Vieira, Dr. Eng. - UFSC/Florianópolis

Dedico este trabalho a todos os
profissionais que laboram em
abatedouros e frigoríficos.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer à **minha família** pela compreensão e paciência durante os três anos de mestrado que estive menos presente.

À minha esposa, **Adriana Seára Tirloni** e aos meus filhos, **Nícolas Tirloni** e **Bárbara Seára Tirloni**, que estiveram sempre ao meu lado, me apoiando, me ajudando na correção e formatação do manuscrito e a superar as dificuldades.

Ao amigo **prof. Nestor Roqueiro**, pela orientação, por ter confiado na minha capacidade e pela oportunidade de crescimento profissional. Muito obrigado!

Aos **professores** da Pós-Graduação e aos **colegas de mestrado** pela competência e transferência de conhecimentos.

Aos amigos e parceiros em projetos **Glauco Cardozo** e **Fernando Effting da Silva**, pelo auxílio no desenvolvimento dos programas computacionais.

Enfim, agradeço **a todos** que, direta ou indiretamente contribuíram para a concretização de mais uma etapa da minha vida profissional.

“Reforma íntima do ser, caminho inteligente para evolução sadia da sociedade” Autor

Para efetiva evolução da sociedade humana há necessidade de se fazer a reforma íntima do ser. Um olhar único e exclusivo do próprio indivíduo sobre ele mesmo, desprendido das “bengalas” produzidas ao longo da jornada. Medo é doença. Culpa é doença. Vaidade é doença. Orgulho é doença. Egoísmo não é doença, faz parte da evolução do altruísta, afinal, a natureza não dá saltos. Não espere do outro o que ele não tem para lhe dar, pois, ninguém dá o que não tem! Ninguém ajuda quem não quer ser ajudado! Só identifico no outro, o que existe em mim! Ser bom antes de fazer o bem!

Compilado ao longo do tempo

RESUMO

A implementação no ambiente laboral de algum tipo de ferramenta para medição pode interferir na execução da tarefa e influenciar na coleta de dados, seja pelo fator físico e/ou psicológico. No primeiro, existe a possibilidade de acontecer a redução da amplitude do movimento e/ou o comprometimento do desempenho, por não utilizar a mesma ferramenta de uso diário durante as coletas. Na parte psicológica, o movimento tem a possibilidade de não ser espontâneo, ou seja, saber que está sendo avaliado pode também distorcer o padrão de movimento durante a atividade laboral. Nesse sentido, este trabalho tem como objetivo desenvolver instrumentação para coleta de dados imperceptível ao trabalhador de frigoríficos e abatedouros, ou seja, a ferramenta instrumentalizada possuirá as mesmas características da ferramenta original, em todos os aspectos: visual, massa e centro de gravidade. Esta dissertação teve como método o desenvolvimento laboratorial (sem dados de campo), com uma abordagem quantitativa e de natureza aplicada. Primeiramente, foi realizado um levantamento sobre a medição do fio de corte, as técnicas utilizadas de coletas de dados e os respectivos transdutores. Em seguida, após a definição da transdução que deve compor o instrumento final, estabeleceram-se as etapas com suas atividades e características. Na sequência definiu-se o fluxo de desenvolvimento necessário para o sequenciamento das etapas, considerando a interdependência das ações dentro de cada etapa e a inter-relação e hierarquia entre as etapas. Concluiu-se que o objetivo maior de não descaracterizar o instrumento original, no que tange ao formato da ferramenta, foi atingido. No que se refere às rugosidades do cabo, percebe-se que os dois materiais utilizados não reproduziram com fidelidade os detalhes capturados pela digitalização. Isso se deve, muito provavelmente, pelos métodos de fabricação não terem sido o mesmo utilizado pelo fabricante do cabo original. Com relação à transmissão de dados sem fio, além de obter sucesso no enlace de comunicação, pode-se utilizar uma tecnologia não proprietária, viabilizando a interoperabilidade com outros tipos de dispositivos que não dispõem de portas USB (*Tablets, Smartphones*, entre outros), sem o uso de receptores específicos. No que diz respeito a massa e ao centro de gravidade, a busca em extrair todo e qualquer material do interior do cabo da faca permitiu posteriormente posicionar estrategicamente os componentes, permanecendo as mesmas especificações da ferramenta original. Com relação a linearidade, sensibilidade e repetibilidade dos dados, observou-se que o comportamento do transdutor é predominantemente linear e a

sensibilidade e repetitividade são aceitáveis para a aplicação que se almeja.

Palavras-chave: Coleta de dados. Ferramenta instrumentalizada. Faca. Transdutores.

ABSTRACT

The implementation in the work environment of some kind of tool to measure can interfere with the task of execution and influence the data acquisition, either by physical factor and / or psychological. In the physical factor, there is a possibility to happen reduced range of motion and / or impairment of performance, not to use the same daily tool for the data acquisition. In the psychological part, the movement has the ability to be spontaneous, that is, to know that is being evaluated can also distort the pattern of movement during labor activity. In this sense, this work aims to develop instrumentation for data acquisition imperceptible to slaughterhouse worker, that is the instrumented tool possess the same characteristics as the original tool in all aspects: visual, mass and gravity center. This dissertation had as a method, the laboratory development (without field data acquisition), with a quantitative approach and applied nature. First, a survey was conducted on the measurement of the cutting wire, the techniques of data acquisition and its transducers. Then, after setting the transduction that should compose the final instrument, set up the steps with their activities and characteristics. After that it was defined the development flow necessary for the sequencing of steps, considering the interdependence of actions within each stage and the inter-relationship and hierarchy between steps. Related to the tool shape it was concluded that the ultimate goal of not disfigure the original instrument has been reached. As regards the cable roughness, it is clear that the two materials used did not reproduce faithfully the details captured by scanning. This is due, most likely, the manufacturing methods were not the same used by the original cable manufacturer. Related to wireless data transmission, as well as succeeding in the communication link, you can use a non-proprietary technology, enabling interoperability with other devices that do not have USB ports (Tablets, Smartphones, etc.), without using specific receptors. Regarding to the mass and center of gravity, the attempt to extract any and all material within the handle of the knife then allowed to strategically position the components, remaining the same specifications as the original tool. Regarding to linearity, sensitivity and repeatability of data, it was observed that the transducer behavior is predominantly linear, and the sensitivity and repeatability are acceptable to the application that aims.

Keywords: Data acquisition. Instrumentalized tool. Knife. Transducers.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - As primeiras ferramentas manuais	29
Figura 2 - Nomenclatura das partes de uma faca	30
Figura 3 - Decomposição estrutural metálica	33
Figura 4 – Tipos de fios (gumes)	34
Figura 5 – Extensômetro de resistência elétrica.....	48
Figura 6 – Dimensões de um modelo de extensômetro	50
Figura 7 – Barra prismática submetida a um esforço “P”	51
Figura 8 – Diagramas Tensão X Deformação.....	53
Figura 9 – Barra Fletida.....	54
Figura 10 – Diagrama de um transdutor de força	55
Figura 11 – Ponte Completa de Wheatstone.....	56
Figura 12 – Simetria térmica.....	57
Figura 13 – Tração e Compressão.....	57
Figura 14 – Efeito do momento sobre uma viga em balanço/biengastada	58
Figura 15 – Transdutor do tipo lâmina engastada.....	59
Figura 16 – Diagrama básico de amplificação.....	63
Figura 17 – Fotografia microscópica de um acelerômetro MEMS	64
Figura 18 – Representação conceitual de um acelerômetro	66
Figura 19 – Proposta de modificação.....	70
Figura 20 – Estrutura de Decomposição do Projeto (EDP)	70
Figura 21 – Fluxo de desenvolvimento	74
Figura 22 – Embalagem com modelo em destaque	78
Figura 23 – Pesando a faca.....	79
Figura 24 – Serrando o cabo	79
Figura 25 – Espiga da lâmina aparente	80

Figura 26 – Pesando a lâmina	80
Figura 27 – Cabo original	80
Figura 28 – Modelo do cabo digitalizado	81
Figura 29 – Esboço inicial da estrutura mecânica da célula de carga ...	81
Figura 30 – Forças atuantes sobre a espiga durante etapa normal de corte	83
Figura 31 – Locais de maior esforço.....	83
Figura 32 – Vista lateral e superior com cotas.....	84
Figura 33 – Célula de Carga virtual.....	84
Figura 34 – Protótipo com roscas e parafusos	84
Figura 35 – Comparando tamanhos da célula de carga x espiga.....	85
Figura 36 – Célula de carga sobreposta à espiga para identificar modificações.....	85
Figura 37 – Espiga modificada e ancorada na célula de carga	86
Figura 38 – 4 Extensômetros duplos que integrarão a célula de carga .	86
Figura 39 – Célula de carga com extensômetros	87
Figura 40 – Célula de carga com os microfios (esmaltados) soldados..	87
Figura 41 – Célula de carga com a PCI de ancoragem.....	87
Figura 42 – Célula de carga com camada de proteção	88
Figura 43 – Diagrama elétrico do amplificador de instrumentação	88
Figura 44 – Diagrama elétrico do microcontrolador e periféricos	89
Figura 45 – Bateria de polímero de lítio	90
Figura 46 – Carregador interno por indução (receptor).....	91
Figura 47 – Carregador externo (transmissor).....	91
Figura 48 – Fases de carregamento da bateria	92
Figura 49 – Lado A	92
Figura 50 – Lado B.....	93

Figura 51 – Em destaque, o sólido inserido no interior do cabo	93
Figura 52 – Digitalização, inserção do sólido no interior do cabo e modelo acabado, respectivamente	94
Figura 53 – Cabo virtual finalizado	94
Figura 54 – Módulo Bluetooth Panasonic com dimensões de 9,0 mm x 9,5 mm x 1,8 mm.....	95
Figura 55 – Dados gráficos e numéricos de força, posição espacial, temperatura e bateria	96
Figura 56 – Cabo em ABS	96
Figura 57 – Cabo em Poliamida.....	97
Figura 58– Vista lateral do cabo	97
Figura 59 – Vista Inferior do cabo	98
Figura 60 – Sistema de Calibração e Teste – SCT.....	99
Figura 61 – Vista em perspectiva do SCT	100
Figura 62 – Habitat de teste do SCT	100
Figura 63 – Aquisição de dados da célula de carga	101
Figura 64 – Simulação no posicionamento de componentes	103
Figura 65 – Montagem componentes.....	103
Figura 66 – Protótipo finalizado	104
Figura 67 – Vista superior da ferramenta original e sua simetria.....	105
Figura 68 – Vista lateral, reta r.....	105
Figura 69 – Centro de gravidade aproximado na vista superior.....	105
Figura 70 – Vista lateral, reta s	105
Figura 71 – Centro de gravidade aproximado na vista lateral	105
Figura 72 – Dimensões dos cabos e as posições medidas	108
Figura 73 – Gráfico comportamental relativo à resolução de 10 gramas	110

Figura 74 – Gráfico comportamental relativo à resolução de 100 gramas	
.....	110
Figura 75 – Gráfico comportamental relativo à resolução de 500 gramas	
.....	111
Figura 76 – Gráfico de linearização das amostras de 0 a 100 gramas.	114

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Características dos artigos pesquisados	39
Quadro 2 – Frequência dos tipos de instrumentação utilizados nos artigos	42
Quadro 3 – Características de extensômetros comerciais.....	49
Quadro 4 – Número de Extensômetros X Linearidade.....	56
Quadro 5 – Dados do receptor da fonte de alimentação	90
Quadro 6 – Dados do transmissor da fonte de alimentação.....	91

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Medidas dos cabos em milímetros	98
Tabela 2 – Coletas da célula de carga	102
Tabela 3 – Massa das facas	104
Tabela 4 – Diferença no centro de gravidade	106
Tabela 5 – Percentual de discrepância entre os cabos	109
Tabela 6 – Valores e médias das amostras até 100 gramas	112
Tabela 7 – Valores e médias das amostras de 100 a 1000 gramas	113
Tabela 8 – Repetibilidade do transdutor	115

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	25
1.1	Problema	25
1.2	Objetivos	26
1.2.1	Objetivo geral	26
1.2.2	Objetivos específicos	26
1.3	Justificativa.....	27
1.3.1	Relevância.....	27
1.3.2	Ineditismo	27
1.4	Delimitação do estudo.....	27
1.5	Estrutura da dissertação	28
2	REFERENCIAL TEÓRICO E ESTADO DA ARTE	29
2.1	Ferramenta manual	29
2.2	Desenho das ferramentas manuais.....	31
2.3	Fabricantes nacionais	31
2.4	Fabricação da faca para frigoríficos.....	31
2.5	Variáveis do desempenho da faca	33
2.6	Operação de afiação	35
2.7	Certificação internacional.....	36
2.8	Tipos de instrumentação	37
2.8.1	Busca na literatura internacional	37
2.8.2	Método	38
2.8.3	Resultados	38
2.8.4	Fechamento da pesquisa	45
2.9	Proposta alternativa de transdutor.....	45
2.10	Dados para elaboração do transdutor e modificação estrutural do cabo.....	46
3	FUNDAMENTOS DA EXTENSOMETRIA, CONDICIONAMENTO ELETRÔNICO E ACCELEROMETRIA.....	47
3.1	Extensometria.....	47
3.1.1	Extensômetros.....	48
3.1.2	Formato estrutural mecânico da superfície metálica elástica... 50	
3.1.2.1	Diagrama dos ensaios de tração.....	52
3.1.3	Projeto de design mecânico/elétrico do transdutor de força 55	
3.1.4	Sistema de calibração e teste para transdutor de força (célula de carga)	61
3.2	Condicionamento eletrônico	62
3.2.1	Condicionador.....	62

3.3	Acelerometria	64
3.3.1	Acelerômetro	64
3.3.2	Módulo sensor	66
3.3.3	Cálculos do acelerômetro	67
4	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	69
4.1	Classificação da pesquisa	69
4.2	Proposta de instrumentalização	69
4.3	Roteiro de pesquisa.....	70
4.4	Atividades	71
4.4.1	Atividades relacionadas com o instrumento Faca	71
4.4.2	Atividades relacionadas com a Célula de Carga	71
4.4.3	Atividades relacionadas com a PCI de Instrumentação	72
4.4.4	Atividades relacionadas com a Alimentação Elétrica	73
4.4.5	Atividades relacionadas com o Software Embarcado	73
4.4.6	Atividades relacionadas com o Transceptor USB	73
4.4.7	Atividades relacionadas com o Software de Comunicação/Dados (microcomputador).....	73
4.5	Sequenciamento das etapas	74
4.6	Execução das atividades com os resultados das etapas	77
4.7	Fabricação, montagem e teste do protótipo	96
4.7.1	Cabo	96
4.7.2	Ensaio e testes com a célula de carga	98
4.7.3	Simulação de leiaute da PCI.....	102
4.7.4	Fase inicial da montagem do protótipo	103
4.7.5	A massa entre a ferramenta original e a instrumentalizada....	104
4.7.6	Centro de gravidade entre a ferramenta original e a instrumentalizada	104
4.7.7	Impacto da estanqueidade do cabo/haste na sensibilidade e linearidade	106
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	107
5.1	Cerne do desenvolvimento	107
5.2	Protótipo do cabo.....	107
5.3	Desempenho do transdutor.....	109
5.4	Informações do protótipo faca	115
6	CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES	117
	REFERÊNCIAS.....	119
	APÊNDICE.....	131

1 INTRODUÇÃO

1.1 Problema

O crescente afastamento dos trabalhadores de frigoríficos por Lesões por Esforços Repetitivos (LER) e Distúrbio Osteomuscular Relacionado ao Trabalho (DORT) tem motivado o Ministério Público do Trabalho (MPT) a realizar “Forças Tarefas Nacionais” neste tipo de indústria (MPT, 2012). Para Sardá (2012), o trabalho em frigoríficos vem gerando uma legião de jovens lesionados. Oliveira (2011) cita que o setor frigorífico emprega em torno de 800 mil pessoas no país e 25% desses estão afastados em razão de doenças trabalhistas.

O trabalho de corte com uso da ferramenta faca para os trabalhadores que laboram em frigoríficos é um trabalho diferenciado, tanto que a legislação trabalhista prevê o Adicional Faca, o qual assegura um aditivo salarial no valor de 10% do salário normativo da categoria (TRT4, 2009). Para Buckle (1997), a aplicação de força ou compressão mecânica dos tecidos é um fator de risco para LER/DORT. Segundo Claudon e Marsot (2006), o design da faca deve ser mais bem estudado, pois pesquisas constataram que com facas bem afiadas a estimulação eletromiográfica foi menor nos músculos flexor superficial dos dedos, bíceps braquial, tríceps braquial, parte anterior do deltoide e parte superior do músculo trapézio que com facas mal afiadas.

Estudar alternativas efetivas de avaliação precoce da sintomatologia da LER/DORT se faz imprescindível para a melhoria das condições de trabalho nesses ambientes (MORO, 2011). Porém, uma ação preventiva para o surgimento de DORT pode ser a utilização, durante a atividade laboral, de facas instrumentalizadas, que indiquem o momento de troca ou afiação. Para McGorry *et al* (2000) citam que deve haver uma adequação da instrumentação de medição para suprir a falta de dados de campo. Sendo assim, o problema de pesquisa se apresenta como a ausência de uma instrumentação completamente integrada à ferramenta faca, que impossibilita a real aquisição dos dados em campo.

Pesquisas em frigoríficos são realizadas utilizando-se dos recursos de entrevistas, coleta de dados das condições ambientais de trabalho, filmagens dos movimentos realizados, imagens térmicas das mãos, investigam a relação entre o uso de ferramentas com as variáveis temperatura das mãos (RAMOS et al., 2015) e desconforto corporal (TIRLONI, REIS, MORO, 2015), porém não há estudos que avaliem graficamente a força aplicada durante a jornada de trabalho, identificando assim o momento que a ferramenta deve ser trocada ou afiada.

Neste sentido, o desafio está em instrumentalizar uma ferramenta igual à utilizada no dia-a-dia do frigorífico, mantendo as mesmas características físicas, massa¹ e formato, neste caso, eliminando o efeito psicológico no trabalhador durante a medição, ou seja, ao usar uma ferramenta instrumentalizada o padrão de movimento realizado rotineiramente pode tornar-se artificial, pelo fato do trabalhador saber que está sendo avaliado. Esta abordagem propiciará uma análise ergonômica com maior abrangência e rigor, permitindo também avaliar a existência da necessidade de implantar novos padrões de comportamento com o manuseio da ferramenta.

Sendo assim, com base nos pressupostos supracitados, elaborou-se a pergunta de pesquisa:

É possível desenvolver uma ferramenta com instrumentação que possua as mesmas características de uma faca comum utilizada em frigoríficos?

Para adquirir do ambiente real o máximo de fidelidade na aquisição de dados é necessário uma instrumentação que não modifique o projeto original da ferramenta, ou seja, não altere o centro de gravidade do instrumento, não acrescente massa, não restrinja o movimento, por algum tipo de conexão física (cabo elétrico), e não cause interferência psicológica, ativando a não espontaneidade do executor da tarefa.

Não alterar o cenário de desenvolvimento da tarefa com a inserção de novas variáveis durante a aquisição dos dados é um dos preceitos a ser cumprido.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

Instrumentalizar uma faca de desossa utilizada em frigoríficos, mantendo as suas características físicas.

1.2.2 Objetivos específicos

- Comparar as variáveis, massa, centro de gravidade e dimensões da ferramenta instrumentalizada com a ferramenta original.
- Verificar a sensibilidade, a linearidade e o índice de repetibilidade dos dados de força aplicada no transdutor.
- Adquirir os dados de movimento nos três eixos (x, y, z).

¹ Massa de um corpo é a medida de sua inércia (ZILIO; BAGNATO, 2002). O termo peso é frequentemente associado a um corpo, sendo às vezes, confundido com massa. A palavra peso é usada corretamente apenas quando está associada à força (CRUZ, 2001).

1.3 Justificativa

A realização desse estudo justifica-se pela sua relevância e ineditismo.

1.3.1 Relevância

Este estudo é importante no intuito de propiciar aos profissionais de ergonomia, segurança do trabalho, engenharia de produção, entre outros, uma ferramenta de coleta de dados idêntica à ferramenta utilizada diariamente. Com esse instrumento será possível adquirir informações que poderão propor ações que minimizem os riscos a que são expostos os trabalhadores de abatedouros e frigoríficos.

1.3.2 Ineditismo

Para denotar o ineditismo deste trabalho, buscou-se realizar na literatura internacional, com base nos dados da biblioteca virtual *ELSEVIER – ScienceDirect*, no período de 2000 a 2012, a identificação de bibliografias com o tema central desta pesquisa: a instrumentação na aquisição de dados durante o manuseio da lâmina de corte em abatedouros e frigoríficos, mais especificamente, a faca de desossa. Nessa busca, dos 24 artigos encontrados, nenhum considerou embarcar tecnologia mantendo as características físicas da ferramenta original.

A escolha da biblioteca virtual *ELSEVIER – ScienceDirect* deu-se em virtude de ser uma base importante de publicações em engenharia e da possibilidade do conteúdo aparecer nas publicações da área da ergonomia (trabalho). Principalmente por se tratar da instrumentação de uma ferramenta manual, onde necessariamente utiliza-se um trabalhador e com isto, a necessidade de se obter métricas.

1.4 Delimitação do estudo

- Pretendeu-se a partir de um modelo original de ferramenta faca chegar a um protótipo com instrumentação executando modificações na estrutura interna do cabo e na ancoragem da espiga da lâmina no cabo.
- Os requisitos mínimos e máximos para o desenvolvimento da instrumentação foram extraídos do referencial teórico e das referências bibliográficas do estado da arte.

- O teste piloto do protótipo teve apenas como objetivo a análise do índice de repetibilidade dos dados coletados e para isto se pautou do cenário de teste em laboratório

1.5 Estrutura da dissertação

Esta dissertação está estruturada de acordo com os seguintes capítulos.

No capítulo 2 são apresentados o referencial teórico e o estado da arte, com um enfoque sobre a ferramenta manual faca e suas características, a operação de afiação, a certificação por um organismo internacional, uma pesquisa de revisão bibliográfica sobre o estado da arte nos tipos de instrumentação utilizados na aquisição de dados durante o manuseio de ferramentas de corte em abatedouros e/ou frigoríficos, a utilização de outro tipo de transdutor para coleta de dados e as informações necessárias para desenvolvimento da instrumentação.

No capítulo 3 encontram-se os fundamentos necessários para o projeto do transdutor célula de carga, o condicionador eletrônico e a tecnologia *MEMS (Micro-Electro-Mechanical System)* ou Sistema Micro Eletromecânico.

O capítulo 4 mostra os procedimentos metodológicos referentes à elaboração da instrumentação da ferramenta. Inicia com a classificação da pesquisa e a proposta de instrumentalização, descreve a estrutura de decomposição do projeto, as atividades e características, o sequenciamento das atividades em etapas, a nova distribuição das atividades dentro das etapas e, por fim, o resultado da execução das atividades.

No capítulo 5, estão apresentados os resultados com relação aos testes de comparação das variáveis, massa e centro de gravidade da ferramenta instrumentalizada com a ferramenta original. Os resultados de sensibilidade, de linearidade e índice de repetibilidade do transdutor e como obter os dados de movimento nos três eixos da ferramenta.

No capítulo 6, estão apresentadas as conclusões do estudo e as recomendações para utilização da ferramenta com instrumentação e para a realização de trabalhos futuros sobre o tema.

As referências utilizadas nesse estudo são apresentadas logo em seguida, finalizando com o apêndice.

2 REFERENCIAL TEÓRICO E ESTADO DA ARTE

Este capítulo aborda dez itens que subsidiaram parte deste estudo. Primeiramente, apresenta-se um enfoque sobre a ferramenta manual faca, sua estrutura e processo de fabricação industrial. Na sequência, as variáveis de desempenho, a operação de afiação e a certificação por um organismo internacional. Posteriormente, uma busca internacional sobre tipos de instrumentação utilizados na aquisição de dados durante o manuseio de ferramentas de corte em abatedouros e/ou frigoríficos. Por fim, uma alternativa para utilização de outro tipo de transdutor para a coleta de dados e as informações necessárias para desenvolvimento da instrumentação.

2.1 Ferramenta manual

São várias as ferramentas manuais utilizadas em frigorífico (faca, tesoura, balancim, roldana, gancho, trimer, vara, chaira, entre outros), porém no presente estudo priorizou-se em abordar a ferramenta faca.

Por faca compreende-se qualquer objeto cortante capaz de ser empunhado (OLIVEIRA, 2012). É uma definição bastante genérica, mas este tipo de ferramenta comporta um número tão grande de variações que talvez esta seja uma definição bastante aproximada. São instrumentos muito antigos (Figura 1), pode-se supor que estejam dentre as primeiras ferramentas inventadas pelo homem.

Figura 1 - As primeiras ferramentas manuais



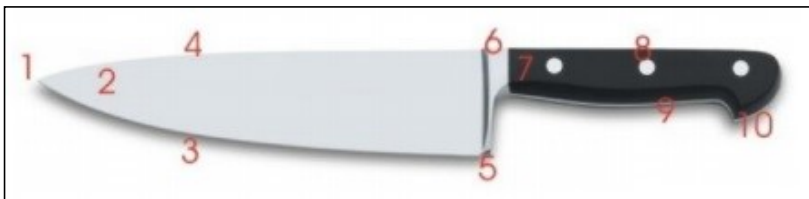
Fonte: Adaptado de Oliveira (2012)

De acordo com o dicionário da língua portuguesa, faca tem o significado de: “instrumento cortante, constituído de lâmina e cabo” (FERREIRA, 1999).

Ao longo da história humana, as facas foram produzidas das mais diferentes maneiras em várias sociedades, desde as pedras lascadas pelo homem primitivo, passando pelas facas produzidas a partir de pedaços de meteoritos ricos em ferro, até as facas produzidas nos dias de hoje pela indústria moderna (OLIVEIRA, 2012).

De maneira geral, o processo de fabricação de uma faca atualmente consiste em modelar a lâmina, seja através do processo de forja ou de desbaste, e aplicar um tratamento térmico conhecido como têmpera, que confere dureza ao fio da lâmina. A lâmina então é afiada e cabeada. Não há um consenso ou uniformidade na nomenclatura das partes de uma faca; regionalmente, cada parte da faca pode assumir uma denominação específica (OLIVEIRA, 2012). Na Figura 2 pode-se ver a versão mais popular da nomenclatura.

Figura 2 - Nomenclatura das partes de uma faca



Fonte: Adaptado de Oliveira (2012)

1. ponta; 2. lâmina; 3. gume; 4. dorso; 5. guarda-mão; 6. botão (parte integral da lâmina que distribui a massa do conjunto); 7. talas do cabo; 8. pinos de fixação; 9. espiga (extensão da lâmina ao longo do cabo, em algumas facas pode ficar oculta); 10. talão, ou base (proporciona mais controle e segurança na empunhadura)

Cutelaria é a arte, ofício ou oficina do cuteleiro, a pessoa que fabrica ou vende instrumentos de corte (FERREIRA, 1999). São produtos da cutelaria: espadas, adagas, facas, facões, machados, punhais, navalhas e todos utensílios metálicos de corte.

Algumas denominações também para cutelaria = armaria ou armaaria e para cuteleiro = cutileiro, armiário, armaário ou acerador.

Em suma, faca é uma ferramenta manual cortante, composta por cabo e lâmina.

2.2 Desenho das ferramentas manuais

Conforme IIDA (2005), o desenho das ferramentas manuais tem uma grande influência sobre a postura no trabalho, ângulo de flexão do punho, distribuição da pressão sobre a mão, carga muscular, fadiga e risco de lesões. Ainda de acordo IIDA (2005), muitas vezes, mudanças de alguns detalhes no desenho podem provocar efeitos enormes, considerando que certos tipos de profissionais usam a mesma ferramenta de forma contínua, durante meses e anos seguidos. As principais variáveis a serem consideradas pelo projetista são:

- resultados mecânicos (força, torque, aceleração);
- massa e centro de gravidade;
- forma e dimensões da pega;
- possibilidade de mudar o manejo; e
- superfície de contato com as mãos.

2.3 Fabricantes nacionais

Após busca na rede mundial de computadores e em casas especializadas no comércio de facas, identificaram-se os dois maiores fabricantes nacionais:

A Mundial S.A. surgiu da unificação de dois grandes grupos – a Eberle, fundada em Caxias do Sul, na Serra Gaúcha, em 1896, e a Zivi-Hercules, que iniciou suas atividades em Porto Alegre, em 1931. Desde o final de 2003, a denominação do grupo passou a ser Mundial SA Produtos de Consumo. Exporta seus produtos para 87 países, em cinco continentes. No Brasil, tem fábricas localizadas na região Sul, mais precisamente em Porto Alegre, Gravataí e Caxias do Sul (MUNDIAL, 2011).

A Tramontina foi fundada em 1911, na cidade de Carlos Barbosa, Rio Grande do Sul. Hoje, está presente em mais de 120 países, com mais de 18000 produtos diferentes (TRAMONTINA, 2015).

2.4 Fabricação da faca para frigoríficos

De acordo com a fabricante Tramontina, os materiais empregados para fabricação da faca utilizada em frigoríficos são os seguintes:

- cabos produzidos em polipropileno (PP) injetado; e
- lâminas fabricadas com aço inoxidável (aço inox especial DIN 14110). A composição química desse aço, após tratamento térmico, oferece requisitos de estrutura e dureza para uma

maior capacidade de corte, durabilidade e resistência à corrosão.

Ainda de acordo com a fabricante, o processo fabril tem o seguinte sequenciamento (lâmina e cabo).

O formato externo/perfil das lâminas é obtido por meio do corte a laser de bobinas de aço inox.

O tratamento térmico - Garante resistência ao desgaste do fio. A mudança de estrutura do aço aumenta a dureza e a resistência das lâminas. O processo de tratamento térmico é totalmente controlado através de medidores de temperatura, de dureza e pela análise da estrutura interna do aço com o auxílio de microscópio.

O tratamento térmico possui três fases:

1. têmpera - As lâminas são aquecidas a uma temperatura superior a 1000°C e, depois, resfriadas rapidamente. A lâmina de aço inox fica dura e resistente ao desgaste, porém com baixa resistência a impactos e a flexões. Nesta fase, a estrutura do aço inox ainda precisa ser melhorada, pois algumas de suas partes ainda não estão completamente endurecidas;
2. subzero - A melhoria da estrutura é feita através do resfriamento das lâminas a uma temperatura bem inferior a 0°C . As lâminas são congeladas para que o aço inox ganhe uma excelente estabilidade e resistência ao desgaste; e
3. revenimento - Soluciona o problema da baixa resistência a impactos e flexões mencionado na fase têmpera. As lâminas são aquecidas a temperaturas não superiores a 300°C , deixando as peças com a dureza entre (55 e 58) HRC (Sistema de medição de dureza). Nesta fase, as lâminas apresentam uma excelente resistência ao desgaste, impactos e flexões. São eliminadas as tensões do aço, geradas nas fases anteriores.

Usinagem - Após o tratamento térmico, as lâminas são submetidas à usinagem, que é dividida em cinco operações:

1. desbaste do perfil: melhoria no acabamento do perfil da lâmina;
2. desbaste das faces: obtenção dos ângulos nas faces da lâmina;
3. satin das faces: acabamento final nas faces da lâmina;
4. lixamento de cantos vivos: operação de arredondamento dos cantos vivos do perfil oposto ao fio; e
5. afiação: operação de abertura do fio.

Um controle dimensional e um monitoramento da qualidade superficial são executados em todos esses processos, evitando o superaquecimento (queima) das lâminas, que gera alteração da dureza obtida no tratamento térmico e a redução da resistência à corrosão.

Portanto, para não prejudicar as operações executadas anteriormente, a usinagem deve ser realizada com equipamentos, ferramentas e refrigeração adequados.

Injeção do cabo - Ocorre no processo final de fabricação. As lâminas recebem o cabo em PP. No polipropileno, é adicionado um produto antibacteriano (Microban®). Para evitar a formação de folgas ou frestas entre as partes e a retenção de resíduos, além de facilitar a limpeza, o cabo é injetado diretamente sobre a espiga da própria lâmina. Os cabos são produzidos em várias cores, facilitando o controle da limpeza e higiene das facas dentro dos frigoríficos, atendendo às exigências da fiscalização de saúde (TRAMONTINA, 2014).

Na leitura dos manuais técnicos dos dois fabricantes, foram extraídas as nomenclaturas utilizadas para designar as partes da estrutura metálica da faca, conforme Figura 3.

Figura 3 - Decomposição estrutural metálica



Fonte: Autor

2.5 Variáveis do desempenho da faca

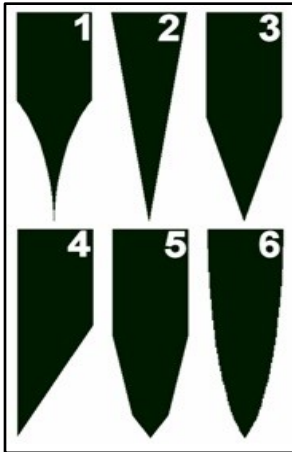
A faca é uma ferramenta simples, de baixo custo e as seguintes variáveis influenciam no seu desempenho (HSIANG et al., 1997).

- Comprimento da lâmina: lâminas curtas permitem transmitir maior força na ponta e as lâminas longas aumentam a velocidade de corte na ponta.
- Largura da lâmina: as lâminas estreitas reduzem o atrito com o material cortado e as lâminas largas melhoram o controle sobre o corte.
- Ângulo cabo/lâmina: a angulação entre o cabo e a lâmina melhora a postura e reduz o estresse sobre o punho.

- Perímetro do cabo: perímetros maiores aumentam a área do contato e reduzem as pressões sobre as mãos, mas podem dificultar o controle e reduzir a pressão do corte.

Conforme Maranhão (2015), um exemplo de formatos de gumes pode ser visto na Figura 4.

Figura 4 – Tipos de fios (gumes)



Fonte: Adaptado de Maranhão (2015)

1. Côncavo (*Hollow*) – Favorece o corte preciso, sendo muito utilizado em navalhas. Devido ao seu formato, é inadequado para o uso “pesado”.
2. Totalmente Reto (*Full Flat*) – Também favorece um corte preciso, fio e lâmina são únicos, porém não é muito utilizado, pois deixa a lâmina mais frágil.
3. Reto (*V Flat*) – Mais simples e comum, este tipo de fio possui a borda afunilada, que beneficia o corte e melhora sua resistência (a partir deste tipo de fio surgem muitas variações, que podem beneficiar mais o corte ou a resistência).
4. Cinzel/Formão – Como o próprio nome indica, possuem o formato de um cinzel (buril), que também confere um corte preciso. São muito utilizadas na culinária japonesa.
5. Fio Composto (*Double Bevel/Compound*) – Este tipo de fio composto (em ângulos diferentes) beneficia a resistência da lâmina. Sua utilidade maior está no uso pesado.
6. Convexo - Muito utilizado em machados e em alguns facões (ex: kukri), este tipo de fio beneficia o uso pesado (mais resistente).

2.6 Operação de afiação

Para Zivi (2001), no momento de afiar uma faca, deve-se saber que a definição do tipo de fio está relacionada ao tipo de operação em que se utilizará a faca. Existem dois principais tipos de afiação com ângulos do fio de 30° ou 15°. A seguir estão descritas as explicações sobre quando utilizar cada tipo de fio:

- fio de 30° possibilita mais durabilidade do fio da faca, pois na região do fio, tem-se uma quantidade maior de material, o que gera resistência superior no momento em que a faca sofre uma batida nesta região. Este fio é aconselhado para quando a faca está em frequente contato com o osso, como nos casos de desossa de frangos; e
- fio de 15° possibilita um maior poder de corte da faca, mas a durabilidade do fio diminui em relação ao ângulo de 30°, uma vez que possui menos material nesta região. Este fio é indicado para operações onde não existe grande risco de contato com osso, por exemplo, na realização de cortes na carne e operações de filetar.

Ainda de acordo com Zivi (2001), cabe a cada frigorífico decidir o tipo de fio a ser usado, conforme estudo de produtividade e relação custo/benefício. Por exemplo, facas com fio de 30° terão durabilidade maior, gerando uma necessidade menor de reafiação. Porém, cada operador terá que exercer maior força para realizar um corte, fazendo com que o trabalho seja menos produtivo e mais cansativo. No caso de fio de 15°, a situação inverte: aumenta o consumo de facas e aumenta a produtividade, no entanto a tarefa é menos cansativa.

A afiação de uma faca é realizada através de duas operações: a afiação propriamente dita e o polimento do fio (ZIVI, 2001).

Afiação pode ser realizada com lixas, pedras, rebolos ou esmeril. A lixa é, dentre todos os processos, o mais produtivo e que gera uma boa qualidade de fio. É importante salientar que quanto menor o grão da lixa, melhor será o fio da faca, contudo, gastam-se mais lixas.

Conforme Zivi (2001), existem lixas produzidas na Suíça com material cerâmico que proporciona uma durabilidade maior da lixa e evita problemas de queima do fio da faca. Este cuidado com a queima do fio define a durabilidade da faca, pois quando o fio é queimado danifica-se a faca e não há como recuperar a estrutura inicial feita no tratamento térmico.

Para Maranhão (2015), a afiação da faca com o polimento do fio tem como objetivo retirar (alinhar) uma pequena rebarba que fica na zona do fio. Para Zivi (2001), quando a faca for bem afiada esta rebarba deve existir, deixando a faca com um bom poder de corte, ou seja, com o corte “suave”, fácil de ser executado. Utiliza-se uma polia de feltro com a superfície plana, que elimina possíveis ondulações do fio. Ainda de acordo com Zivi (2001), existem em alguns frigoríficos equipamentos de polimento que usam uma polia de pano. Esse tipo de polia retira a rebarba, mas não alinha o fio da faca, além de ser mais demorado que o processo com polia de feltro.

Em frigoríficos, existe uma rotina de troca de facas durante o expediente de trabalho, quando as facas são reafiadas e esterilizadas, a frequência dessa rotina varia de um frigorífico para outro. É importante salientar que em muitos casos o fio da faca ainda está em condições de uso, porém está com o corte "pesado" (necessita-se fazer maior esforço para o deslocamento). Dependendo de como estiver a faca, o fio não precisa ser reafiado nas lixas, pois basta um novo polimento para recuperá-lo, deixando o corte "suave" novamente, não gastando a faca. Baseado nisso, Zivi (2001) destaca a importância do operador da afiação estar treinado para conhecer estas situações.

2.7 Certificação internacional

A *National Sanitation Foundation* - NSF é uma organização internacional, sem fins lucrativos, que se dedica à segurança da saúde pública e à proteção do meio ambiente, mediante o desenvolvimento de normas específicas.

Desde 1944 a NSF proporciona educação direcionada e serviços a seus associados, homologa e certifica produtos que têm contato direto com alimentos, inspeciona, faz auditorias e avaliações das normas ISO 9000 e ISO 14000, entre outros.

Para os fabricantes Mundial e Tramontina, facas destinadas à aplicação em frigoríficos necessitam da certificação NSF, que representa o reconhecimento de uma organização internacional e independente.

Como as facas são usadas em diversos tipos de carnes, é fundamental que essas avaliações sejam feitas por profissionais especializados, para que a qualidade do produto e dos materiais utilizados seja comprovada (NSF, 2015).

2.8 Tipos de instrumentação

Muitas são as variáveis envolvidas durante o processo de corte, entre elas, de acordo com McCarthy *et al.* (2007), tipos de materiais; ângulo de ataque da ferramenta sob o material; velocidade; gradiente de temperatura ao longo da ferramenta; raio e nitidez da aresta de corte; força aplicada e a dinâmica dessas variáveis no tempo.

Quando se direciona este tema para produtos biológicos, como carnes, pode-se dizer que, conforme Marsot *et al.* (2007), a variedade expressiva de formas de corte ainda não permitiu a mecanização da tarefa. Talvez por esse motivo, ainda se utilize a faca como instrumento para a desossa em abatedouros e frigoríficos.

De acordo com Silveira *et al.* (2008), a utilização da faca está circunscrita por características físicas e mentais. Os aspectos físicos foram definidos como tipo de pega e textura do cabo, tipo de aço, afiação, inclinação, comprimento e largura da lâmina, massa, frequência de uso, higiene, qualidade, estética, durabilidade, segurança e utilidade. Os aspectos mentais foram definidos como conforto, prazer, satisfação e uso agradável.

Com relação à lâmina de corte são várias as terminologias utilizadas para definir o estado do fio ou gume, entre elas, de acordo com Reilly *et al.* (2004), borda fina, borda rebarba e borda rombuda. Embora os ângulos de afiação sejam diferentes para cada tipo de aplicação, para McCarthy *et al.* (2010), a lâmina torna-se mais afiada a medida que o ângulo de cunha reduz. Para Marsot *et al.* (2007), a força de corte varia de acordo com a inclinação da lâmina, o que corrobora com a existência de formatos variados de lâminas para o tipo de tarefa que se deseja executar. Conforme McGorry *et al.* (2003), a afiação da lâmina tem um significativo impacto na exposição da força de preensão (aperto da mão), momentos de corte e tempos de corte.

Com esta constatação, pode-se compreender por que, conforme Tirloni *et al.* (2012), o treinamento adequado dos chairadores permite realizar a manutenção adequada do fio das facas, possibilitando a redução do esforço necessário para a execução dos cortes, o que também já é previsto pela NBR 14280 (ABNT, 2001), com relação à utilização de um agente com defeito (faca sem corte).

2.8.1 Busca na literatura internacional

Apresentadas as características que permeiam a utilização da ferramenta “faca de desossa”, esta parte do estudo objetivou realizar uma

busca sistemática, sobre os tipos de instrumentação utilizados na aquisição de dados durante o manuseio de ferramentas de corte em abatedouros e/ou frigoríficos.

Bem como, verificar se os estudos de campo sobre instrumentação de faca abordam o fator físico (mobilidade e desempenho do executor da tarefa durante o uso da ferramenta instrumentalizada) e o fator psicológico (saber que está sendo analisado/avaliado).

2.8.2 Método

Foi realizado um levantamento na literatura internacional com a base de dados da biblioteca virtual *ELSEVIER – ScienceDirect*, no período de 2000 a 2012, para identificar bibliografias sobre o tema central desta pesquisa: a instrumentação na aquisição de dados durante o manuseio da lâmina de corte em abatedouros, mais especificamente, “a faca de desossa”.

Os descritores utilizados para a busca de artigos foram: *Technical measurements; Ergonomic measurements; Hand tools; Cutting forces; Sharpness; Knife; Knife sharpness*. Como a aplicação da força de corte está diretamente ligada à pega da ferramenta manual, utilizou-se ainda a adição dos descritores: *Knife handle* e *Grip*, para ampliar a abrangência, pois conforme Waddell et al. (2003), existe um número reduzido de publicações sobre o tema.

A seleção baseou-se na conformidade dos limites dos assuntos aos objetivos deste trabalho, desconsiderados aqueles que, apesar de aparecerem no resultado da busca, não abordavam o assunto sob o ponto de vista da “instrumentação de ferramenta manual para mensuração do fio de corte”.

Os artigos selecionados foram caracterizados segundo o título, o ano de publicação, o local de realização da pesquisa, o periódico escolhido para publicação, o ambiente da coleta de dados e o tipo de instrumentação utilizado.

2.8.3 Resultados

Os resultados desta busca evidenciaram que, dos vinte e quatro artigos encontrados, quinze abordam sobre a instrumentação para medição da força aplicada no manuseio da ferramenta de corte, conforme Quadro 1.

Quadro 1 – Características dos artigos pesquisados

Título	Ano	Local	Periódico	Ambiente da coleta de dados	Tipo de instrumentação
<i>Design and performance of a manual task evaluator</i>	2000	<i>Hopkinton, Massachusetts USA</i>	<i>International Journal of Industrial Ergonomics</i>	Laboratório	Cabo instrumentalizado com transdutor (célula de carga) e cabo elétrico para alimentação
<i>Experimental appraisal of a manual task evaluator</i>	2000	<i>Hopkinton, Massachusetts USA</i>	<i>International Journal of Industrial Ergonomics</i>	Laboratório e ambiente real de desenvolvimento da tarefa	Cabo instrumentalizado com transdutor (célula de carga) e cabo elétrico para alimentação
<i>A system for the measurement of grip forces and applied moments during hand tool use</i>	2001	<i>Hopkinton, Massachusetts USA</i>	<i>Applied Ergonomics</i>	Laboratório	Cabo instrumentalizado com transdutores (3 segmentos com células de carga para registro da força de “pega”) e cabo elétrico para alimentação
<i>Physical workload during manual and mechanical deboning of poultry</i>	2002	<i>Copenhagen Denmark</i>	<i>International Journal of Industrial Ergonomics</i>	Laboratório	Cabo instrumentalizado com transdutor (célula de carga) e cabo elétrico para alimentação; eletrogoniômetro biaxial e eletromiografia
<i>Cutting moments and grip forces in meat cutting operations and the effect of knife sharpness</i>	2003	<i>Hopkinton, Massachusetts USA</i>	<i>Applied Ergonomics</i>	Laboratório	Plataforma automática de simulação com transdutores (3 segmentos com células de carga para registro da força de “pega”) e posicionamento ao longo do eixo da faca (potenciômetro)

Continua

Continuação

Título	Ano	Local	Periódico	Ambiente da coleta de dados	Tipo de instrumentação
<i>The effect of workstation and task variables on forces applied during simulated meat cutting</i>	2004	<i>Hopkinton, Massachusetts USA</i>	<i>Taylor & Francis Health Sciences</i>	Laboratório	Cabo instrumentalizado com transdutor (célula de carga) e cabo elétrico para alimentação; goniômetro elétrico
<i>A technique for field measurement of knife sharpness</i>	2005	<i>Hopkinton, Massachusetts USA</i>	<i>Applied Ergonomics</i>	Laboratório	Plataforma automática de simulação com transdutor (célula de carga) e posicionamento ao logo do eixo da faca (potenciômetro)
<i>The effect of blade finish and blade edge angle on forces used in meat cutting operations</i>	2005	<i>Hopkinton, Massachusetts USA</i>	<i>Applied Ergonomics</i>	Ambiente real de desenvolvimento da tarefa	Cabo instrumentalizado com transdutor (célula de carga) e cabo elétrico para alimentação
<i>Effect of knife sharpness on upper limb Biomechanical stresses a laboratory study</i>	2006	<i>Vandoeuvre France</i>	<i>International Journal of Industrial Ergonomics</i>	Laboratório	Plataforma manual de simulação com goniômetro e transdutores (células de carga)
<i>Influence on grip of knife handle surface characteristics and wearing protective gloves</i>	2006	<i>Vandoeuvre France</i>	<i>Applied Ergonomics</i>	Laboratório	Plataforma de simulação da rotação da faca para registro da força e eletromiografia (análise da pega)
<i>Assessment of knife sharpness by means of a cutting force measuring system</i>	2007	<i>Vandoeuvre Les-Nancy Cedex, France</i>	<i>Applied Ergonomics</i>	Laboratório	Plataforma manual de simulação com goniômetro e transdutores (células de carga)

Continua

Conclusão

Título	Ano	Local	Periódico	Ambiente da coleta de dados	Tipo de instrumentação
<i>On the sharpness of straight edge blades in cutting soft solids: Part I indentation experiments</i>	2007	<i>Dublin, Ireland</i>	<i>Science Direct Engineering Fracture Mechanics</i>	Laboratório	Máquina universal de ensaio com transdutor (célula de carga)
<i>Modeling of blade sharpness and Compression cut of biomaterials</i>	2010	<i>Duluth, Minnesota USA</i>	<i>Journals Cambridge University Press</i>	Laboratório	Robô com controle de velocidade e registro da força/torque e deslocamento
<i>On the sharpness of straight edge blades in cutting soft solids: Part II – Analysis of blade geometry</i>	2010	<i>Limerick, Ireland</i>	<i>Science Direct Engineering Fracture Mechanics</i>	Laboratório	Máquina universal de ensaio com transdutor (célula de carga) e extensômetro laser
<i>Rationalization in meat cutting – Consequences on physical workload</i>	2012	<i>Lund, Sweden</i>	<i>Applied Ergonomics</i>	Ambiente real de desenvolvimento da tarefa	Acelerômetro de três eixos; goniômetro biaxial e eletromiografia

Fonte: Dados da pesquisa

Dos quinze artigos pesquisados apenas três (20%) utilizaram o ambiente real de desenvolvimento da tarefa para a coleta de dados, foram eles: McGorry *et al.*, 2000; McGorry *et al.*, 2005; Arvidsson *et al.*, 2012.

Destaca-se que nenhum desses artigos considerou o fator físico e/ou psicológico do executor da tarefa. Também se constatou que as ferramentas utilizadas durante a coleta de dados não eram as mesmas empregadas durante a realização da atividade laboral.

Dos quinze artigos selecionados, identificou-se o uso de doze tipos diferentes de instrumentação, sendo o de maior frequência o cabo instrumentalizado com transdutor (célula de carga para registro da força de corte) e cabo elétrico para alimentação, conforme Quadro 2.

Quadro 2 – Frequência dos tipos de instrumentação utilizados nos artigos

Tipo de instrumentação	Autor
Cabo instrumentalizado com transdutor (célula de carga para registro da força de corte) e cabo elétrico para alimentação	McGorry <i>et al.</i> (2000) Murphy <i>et al.</i> (2000) McGorry <i>et al.</i> (2005)
Cabo instrumentalizado com transdutores (3 segmentos com células de carga para registro da força de pega) e cabo elétrico para alimentação	McGorry <i>et al.</i> (2001)
Cabo instrumentalizado com transdutor (célula de carga para registro da força de corte) e cabo elétrico para alimentação; eletrogoniômetro biaxial e eletromiografia	Juul-Kristensen <i>et al.</i> (2002)
Plataforma automática de simulação com transdutores (3 segmentos com células de carga para registro da força de pega) e do posicionamento ao logo do eixo da faca (potenciômetro)	McGorry <i>et al.</i> (2003)
Cabo instrumentalizado com transdutor (célula de carga para registro da força de corte) e cabo elétrico para alimentação; goniômetro elétrico	McGorry <i>et al.</i> (2004)
Plataforma automática de simulação com transdutor (célula de carga para registro da força de corte) e posicionamento ao logo do eixo da faca (potenciômetro)	McGorry <i>et al.</i> (2005)
Plataforma manual de simulação com goniômetro e transdutores (células de carga)	Claudon, & Marsot (2006) Marsot <i>et al.</i> (2007)
Plataforma de simulação da rotação da faca para registro da força e Eletromiografia (análise da pega)	Claudon (2006)
Máquina universal de ensaio com transdutor (célula de carga)	McCarthy <i>et al.</i> (2007)
Robô com controle de velocidade e registro da força/torque e deslocamento	Zhou & McMurray (2010)

Continua

Tipo de instrumentação	Autor
Máquina universal de ensaio com transdutor (célula de carga) e extensômetros laser	McCarthy <i>et al.</i> (2010)
Acelerômetro de três eixos; goniômetro biaxial e eletromiografia	Arvidsson <i>et al.</i> (2012)

Fonte: Dados da pesquisa

Dos tipos de instrumentação empregados, todos que obtiveram os dados no ambiente real de desenvolvimento da tarefa utilizaram um cabo elétrico para interligar o transdutor (acoplado à ferramenta manual de corte) até o aparelho de coleta de dados.

Dos artigos analisados, 80% tiveram seu habitat de desenvolvimento em laboratório. De acordo com Scott e Renz (2006), cenários desenvolvidos em laboratório são improváveis de se tornarem soluções aplicáveis diretamente para resolver problemas industriais. Westgaard e Winkel (1997) argumentam que a principal desvantagem da realização de pesquisas em campo é que a investigação experimental *in loco* é menos controlada que em laboratório, devido a numerosos fatores exógenos que escapam ao controle do pesquisador. Para McGorry *et al.* (2000), em parte, a inadequação da instrumentação de medição gera a falta de dados de campo.

Corroborar-se com a existência dos fatores exógenos citados por Westgaard e Winkel (1997) no parágrafo anterior, pois a implementação de algum tipo de equipamento para mensuração pode interferir na execução da tarefa e influenciar na coleta de dados, seja pelo fator físico e/ou psicológico.

No fator físico, pode acontecer a redução da amplitude de determinado movimento e/ou o comprometimento do desempenho, pois não utilizar o mesmo instrumento de uso diário durante as coletas pode interferir na confiabilidade dos dados.

Na parte psicológica, o movimento pode não ser espontâneo, ou seja, saber que está sendo avaliado pode interferir no padrão de movimento durante a atividade de corte.

Segundo Prates e Barbosa (2003), em técnicas de coleta de dados, um dos desafios para os avaliadores é conseguir observar sem interferir no contexto ou inibir o usuário.

Apesar do papel central que é atribuído ao fio de corte durante o uso de instrumentos cortantes, no estudo de revisão realizado por Reilly et al. (2004), verificou-se que têm sido propostos os fatores que afetam o processo de corte: a geometria da ferramenta, o material da ferramenta, o material do objeto a ser cortado e as condições do fio de corte. Também salienta, que a magnitude da interação é maior entre os três primeiros fatores, enquanto a condição do fio de corte afeta marginalmente a geometria do instrumento.

Ainda de acordo com Reilly et al. (2004), foi constatado que os métodos utilizados para a medição do fio de corte eram variados e que o uso exclusivo de soluções qualitativas e quantitativas não poderiam fornecer informações completas sobre a eficiência de corte do instrumento, pois o processo de corte se modifica a cada evento.

A Norma Regulamentadora – NR 36 (ABNT, 2013), que aborda sobre abate e processamento de carnes e derivados, menciona que os empregados devem implementar sistemas para controle de afiação das facas, estabelecendo mecanismos de reposição constante de facas afiadas e que a organização do processo e a velocidade da linha de produção deve considerar a variabilidade temporal na afiação/chairação das facas.

Por isso, a elaboração de uma faca instrumentalizada torna-se importante para auxiliar na determinação do número de afiações desta ferramenta durante a jornada de trabalho. Segundo a NBR 14280 (ABNT, 2001), a utilização de um agente com defeito (faca não afiada) é uma condição ambiente de insegurança, por conseguinte, causa de acidente de trabalho. Salienta-se que a NR 36 (ABNT, 2013) ainda cita que o tipo, o formato e a textura da empunhadura das facas devem ser apropriados à tarefa, à mão do trabalhador e ao eventual uso de luvas. Isso significa que a instrumentalização dessa ferramenta deve obedecer esses quesitos.

Com o avanço da microeletrônica e da miniaturização dos transdutores, novas oportunidades são apresentadas diariamente como soluções inéditas. Atualmente já existe a possibilidade de se desenvolver uma instrumentalização que minimize a interferência ao usuário e permita a aquisição de dados em uma faixa mais ampla e detalhada.

A utilização da extensometria para o desenvolvimento do transdutor célula de carga, hoje aperfeiçoada para resistências em torno de 1 k Ω , possibilita um consumo menor de energia, comparado às antigas “grades” de 120 Ω e 350 Ω , o que admite a alimentação dos sistemas por pequenas baterias. Pode-se citar ainda a acelerometria com a tecnologia de construção *MEMS* e encapsulamentos em torno de 4 mm². O que proporciona a aquisição de dados de aceleração e posicionamento em três eixos.

2.8.4 Fechamento da pesquisa

Constatou-se que os tipos de instrumentação utilizados para aquisição de dados foram: cabo instrumentado com transdutor e cabo elétrico; acelerômetro/goniômetro/eletromiografia; plataforma manual/automática de simulação; máquina universal de ensaio e robô. Observa-se que todos utilizaram algum tipo de conexão física (cabo elétrico) da ferramenta faca até o aparelho eletrônico de aquisição de dados.

Verificou-se a inexistência de pesquisas de campo que consideraram o tipo de instrumentação uma variável que pode interferir na confiabilidade dos dados, ou seja, não abordaram o fator físico e/ou psicológico.

Conclui-se que, para o desenvolvimento de uma instrumentação que obtenha dados fidedignos num ambiente real, é necessário um aparelhamento que não modifique o projeto original da ferramenta utilizada diariamente nas linhas de produção, não descaracterizando seu aspecto visual e dimensional (interferência psicológica), mantendo a massa e não alterando o centro de gravidade do instrumento, permitindo assim a coleta de dados sem qualquer interferência no cenário laboral.

2.9 Proposta alternativa de transdutor

Em virtude de todos os artigos pesquisados anteriormente terem abordado a mensuração utilizando a extensometria (elemento resistivo), procurou-se pesquisar outro tipo de transdutor que pudesse satisfazer esta mesma função, mensuração do fio de corte, considerando as necessidades de: pouca massa, pequeno volume e baixo consumo de energia, necessários neste quesito.

Uma das possibilidades aventada inicialmente foi a utilização de um sensor piezoelétrico, visto que, seu perfil de miniaturização se encaixa com os quesitos necessários. No entanto, de acordo com Brusamarello (2009), a utilização de um transdutor de força piezoelétrico não permite a medição de força estática, uma vez que, as cargas elétricas surgem apenas quando a carga mecânica é aplicada. Após, a energia será descarregada pela resistência de entrada do instrumento que está medindo. Desta forma inviabilizando a utilização deste tipo de transdutor no projeto.

2.10 Dados para elaboração do transdutor e modificação estrutural do cabo

A faca quando empunhada pelo usuário descreve uma alavanca do tipo interpotente, pois tem-se o fulcro no punho, a potência na palma da mão e a resistência no bordo de ataque da lâmina. Juul-Kristensen et al. (2002) consideraram que a força aplicada pelo ser humano durante as tarefas de desossa orbitam de 6 N (0,61 kgf) a 20 N (2,03 kgf) e algumas variáveis repercutem diretamente nos valores encontrados, como: experiência na tarefa de desossa, idade, altura e massa do trabalhador. Para Madeleine et al. (1999), esta força pode chegar a 30 N (3,05 kgf).

No mesmo estudo de Juul-Kristensen et al. (2002), para a mesma tarefa, porém para a força de pega da ferramenta, foram adquiridas intensidades de 98 N (9,98 kgf) a 108 N (11,00 kgf), que correspondem percentualmente de 31% a 34% da força máxima de pega registrada na pesquisa 315,4 N (32,15 kgf). De acordo com Armstrong et al. (1982), os valores para a pega oscilam entre 69 N (7,03 kgf) e 137 N (13,96 kgf).

Dos dados extraídos das pesquisas, dois valores são importantes para o desenvolvimento da instrumentação da faca: a força aplicada sobre a lâmina e a força de pega no cabo. Esses dois dados nortearam respectivamente o valor máximo necessário para o transdutor de força (célula de carga) e a resistência estrutural interna do cabo.

3 FUNDAMENTOS DA EXTENSOMETRIA, CONDICIONAMENTO ELETRÔNICO E ACELEROMETRIA

Neste capítulo, primeiramente, apresenta-se um enfoque sobre a extensometria e o componente extensômetro de resistência elétrica. O formato estrutural mecânico da superfície metálica elástica que receberá os extensômetros e o diagrama dos ensaios de tração desta estrutura. Na sequência, o projeto de design mecânico/elétrico do transdutor de força e sua calibração. Posteriormente, o condicionador eletrônico e as restrições para este sistema embarcado. Por fim, a acelerometria e suas características para este projeto.

3.1 Extensometria

Em 1678, Robert Hooke estabeleceu a relação que existe entre tensões e deformações em corpos submetidos a solicitações mecânicas. Se o material for isotrópico e homogêneo e seu limite elástico não for superado, então verifica-se que a relação entre a tensão e a deformação é linear (FIALHO, 2002).

A partir desse raciocínio, de acordo com Präss (2015), Hooke escreveu a lei geral “As forças deformantes são proporcionais às deformações elásticas produzidas”.

Em 1856, William Thomson (Lord Kelvin) realizou experimentos sobre a propriedade elétrica dos metais quando submetidos a esforços de tração/compressão e observou que a resistência elétrica variava quando os materiais sofriam deformação na região elástica. Ele verificou que a variação relativa da resistência sobre a variação relativa da deformação é próxima de uma constante e pode ser expressa pela Equação (3.1). O (K) dessa relação chama-se fator *Gauge*.

$$K = \frac{\frac{\Delta R}{R}}{\frac{\Delta L}{L}} \quad (3.1)$$

A relação da resistência é função dos aspectos geométricos: comprimento, l , área da secção transversal, A , e da resistividade, ρ , do material, conforme explicita a Equação (3.2).

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad (3.2)$$

3.1.1 Extensômetros

O extensômetro de resistência elétrica (elemento resistivo), que também é conhecido pelo termo na língua inglesa *Strain Gauge*, é um sensor de deformação relativa, a colagem deste componente em uma superfície metálica elástica sujeita a deformação mecânica, gera no extensômetro uma deformação relativa ε , acarretando na resistência deste componente uma variação $\Delta R / R$ e que pode ser representada pela equação a seguir:

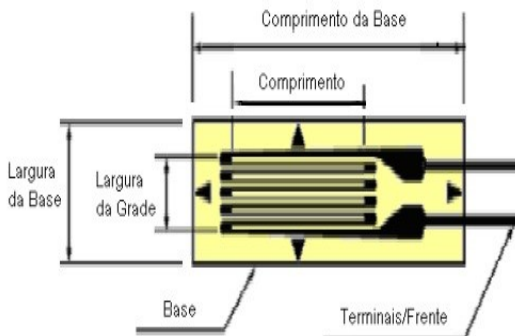
$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} = \left(\frac{1}{K}\right) \cdot \left(\frac{\Delta R}{R}\right) \quad (3.3)$$

Conforme Fialho (2002), o princípio de medida dos extensômetros metálicos baseia-se em três premissas:

- o valor da resistência de um condutor é uma função de suas características geométricas (efeito enunciado por Lord Kelvin) e apresentado em (3.2));
- a todo aumento de comprimento de um condutor corresponde uma redução da seção transversal (efeito de *Poisson*); e
- a variação da resistividade é proporcional à variação relativa de volume (efeito enunciado por Bridgman).

O fator *Gauge*, expressa a sensibilidade e depende do material do extensômetro. A formação deste componente é feita por dois elementos: a base e a grade, conforme Figura 5.

Figura 5 – Extensômetro de resistência elétrica



Fonte: Adaptado de Wiedenhof (2008)

A base é um perfil de epóxi ou poliamida (entre outros materiais), que possui grande elasticidade e tem três funções:

- servir de base para a grade;
- permitir a adesão do sensor à superfície elástica; e
- isolar eletricamente a grade.

A grade, que é o elemento resistivo, pode ser composta quimicamente de acordo com o Quadro 3.

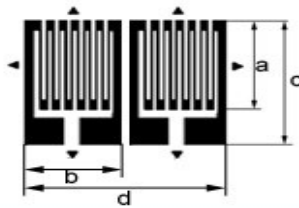
Quadro 3 – Características de extensômetros comerciais

Composição Química	Fabricante	Fator <i>Gauge</i> <i>K</i>	Resistência $\mu\Omega.cm$
55% Cu, 45% Ni	Advance Constanten Copel	2,0	49
4% Ni, 12% Mn, 84% Cu	Manganin	0,47	44
80% Ni, 20% Cu	Nichrome V	2,0	108
36% Ni, 8% Cr, 0,5% Mo, 55,5% Fe	Isoelastic	3,5	110
66% Ni, 33% Cu	Monel	1,9	400
74% Ni, 20% Cr, 3% Al, 3% Fe	Karma	2,4	125

Fonte: Adaptado de Fialho (2002)

Um modelo de extensômetro duplo, com dimensões em mm e em polegadas, conforme o único fabricante nacional do componente pode ser mostrado na Figura 6.

Figura 6 – Dimensões de um modelo de extensômetro



Dimensões			
Cada Grelha		Total	
A (comprim.)	B (largura)	C (comprim.)	D (largura)
1,52mm	1,65mm	3,05mm	3,81mm
0,060 "	0,065 "	0,120 "	0,150 "
3,18mm	1,65mm	5,46mm	3,81mm
0,125 "	0,065 "	0,215 "	0,150 "

Fonte: Adaptado de Excel Sensores (2015)

O fator de Gauge caracteriza a sensibilidade do transdutor, o sinal de entrada é a variação da deformação e o de saída a variação relativa de resistência (BRUSAMARELLO, 2009).

Ainda de acordo com Brusamarello (2009), a sensibilidade do extensômetro para a deformação na direção do cisalhamento é pequena e pode ser desprezada. Entretanto, a sensibilidade à deformação transversal é significativa e os fabricantes fornecem um fator de sensibilidade transversal para cada componente.

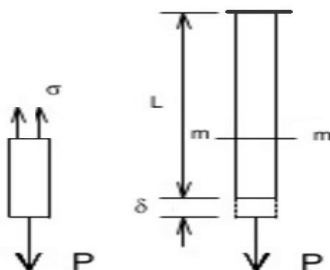
3.1.2 Formato estrutural mecânico da superfície metálica elástica

Para cumprir o papel de elasticidade (efeito mola), a superfície que receberá a fixação do elemento resistivo (extensômetro) necessita ser projetada para permanecer dentro da região elástica de deformação.

Conforme Timoshenko (1977), elasticidade é admitir que um corpo é formado de pequenas partículas ou moléculas, sobre as quais estão atuando forças e estas opõem-se a mudanças que forças exteriores tendem a produzir.

Quando aplicada uma carga em uma barra prismática de eixo reto, como mostra a Figura 7, esta sofre um alongamento movendo-se para baixo e só irá parar de deformar-se quando entrar em equilíbrio. Quando a carga for retirada, a extremidade da barra voltará para seu estado inicial.

Figura 7 – Barra prismática submetida a um esforço “P”



Fonte – Adaptado de Haase (2015)

A propriedade dos corpos de voltar à forma inicial, após a retirada de carga, é chamada de elasticidade. A lei experimental de Hooke, para o caso de uma barra com seção transversal constante, pode ser dada pela seguinte expressão (TIMOSHENKO, 1978):

$$\delta = \frac{P l}{A E} \quad (3.4)$$

Sendo:

P = a força aplicada na barra

l = o comprimento da barra

A = a área da seção transversal da barra

E = módulo de elasticidade

δ = alongamento total da barra

O alongamento da barra, dado pela letra grega δ , é diretamente proporcional à força de tração e ao comprimento da barra, e inversamente proporcional à área da seção transversal e ao módulo de elasticidade da barra.

Tensão, representada pela letra grega σ , de acordo com Timoshenko (1978), é o quociente da força normal por unidade de área da seção transversal da barra e expressa como:

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (3.5)$$

O alongamento por unidade de comprimento é chamado de alongamento relativo ou deformação específica (TIMOSHENKO, 1978), neste caso longitudinal, representado pela letra grega ε , e determinada pela Equação (3.6).

$$\varepsilon = \frac{\delta}{l} \quad (3.6)$$

Na equação (3.7), o módulo de elasticidade da compressão é, para a maioria dos materiais, o mesmo da distensão.

$$E = \frac{\sigma_{max}}{\varepsilon} \quad (3.7)$$

3.1.2.1 Diagrama dos ensaios de tração

Em termos gerais, o teste de tração tem uma só conduta de procedimentos. Basicamente um corpo de prova é submetido a uma carga de tração crescente até atingir a ruptura. As medições feitas ao longo do teste é que diferem, de acordo com o tipo de comportamento do material. Para materiais frágeis, os parâmetros da zona elástica e a tensão de ruptura são identificados no teste. Para os materiais dúcteis, é necessário identificar outros parâmetros, como as tensões durante a fase não linear de deformações, as tensões durante o escoamento e a tensão máxima antes da ruptura.

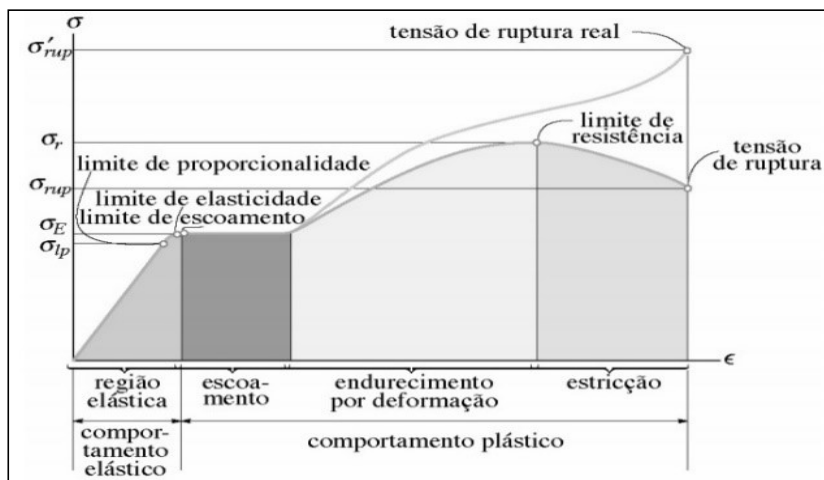
A proporcionalidade entre a força de tração e o alongamento só existe até certo valor limite da tensão, chamado de limite de proporcionalidade, ou elasticidade, o qual depende das propriedades dos materiais elásticos (TIMOSHENKO; GERE, 1994).

Devido à sua simplicidade e ao grande número de informações que pode ser obtido do ensaio de tração uniaxial dos metais, este ensaio é amplamente utilizado e existem muitas normas técnicas que o regulamentam.

O traçado da curva é feito pelo registro das deformações na direção da tensão, para cada valor da tensão no processo de carregamento, assim obtém-se a curva tensão x deformação.

Na Figura 8 é apresentado um diagrama de ensaios de tração, onde na região elástica, a tensão e a deformação são diretamente proporcionais e o diagrama é linear. A partir do ponto chamado de limite de proporcionalidade, as deformações crescem mais rapidamente que as tensões e já não existe mais proporcionalidade.

Figura 8 – Diagramas Tensão X Deformação



Fonte: Adaptado de Aragão (2015)

De acordo com Timoshenko e Gere (1994), quando uma barra prismática é submetida a um esforço de tração, sofre um alongamento e uma contração lateral. Quando a relação entre a contração lateral relativa (deformação específica transversal) ε_t e o alongamento relativo (deformação específica longitudinal) ε for constante na região de proporcionalidade, esta constante é chamada de coeficiente de *Poisson* e representada pela letra grega μ .

$$\mu = \frac{\varepsilon_t}{\varepsilon} \quad (3.8)$$

Fialho (2002) comenta que, a contração lateral relativa (deformação específica transversal) ε_t , são as deformações ocorridas nos eixos Y e Z. Para o coeficiente de *Poisson* existem valores tabelados para os metais e ligas, como: aço, ferro, alumínio, bronze, latão, magnésio, níquel e zinco.

A tensão apresentada anteriormente (eq. 3.5) refere-se à tensão normal. Uma barra pode sofrer também deformações ou distorções causadas por tensões de cisalhamento.

Para Timoshenko e Gere (1994), estas tensões têm direção perpendicular à barra, ou paralela ao plano da seção transversal “mn”, caso a barra esteja sendo submetida a flexão, como mostra a Figura 9 (a).

A tensão de cisalhamento é dada pela equação (3.9), na qual γ representa a deformação de cisalhamento e G é chamado de módulo de elasticidade transversal.

$$\tau = G\gamma \quad (3.9)$$

O módulo de elasticidade transversal pode ser expresso em função do módulo de elasticidade, E , e do coeficiente de *Poisson*, μ . Dessa forma, G pode ser representado por (TIMOSHENKO; GERE, 1994):

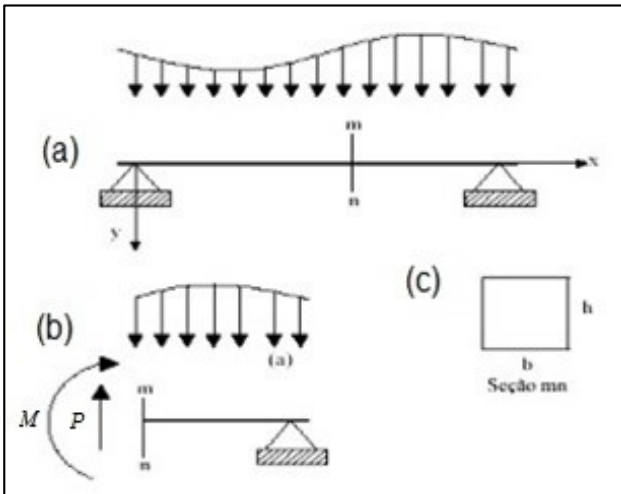
$$G = \frac{E}{2(1+\mu)} \quad (3.10)$$

Efetuada um corte na seção “mn” da barra (Figura 9 (a)), e substituindo as forças equivalentes por uma força P e um momento M na parte restante da barra, para que continue em equilíbrio, tem-se o diagrama representado na Figura 9 (b).

Considerando que a barra tem uma seção retangular, como mostrado na Figura 9 (c), a tensão máxima de cisalhamento é dada pela equação (TIMOSHENKO; GERE, 1994):

$$\tau_{max} = \frac{3P}{2bh} \quad (3.11)$$

Figura 9 – Barra Fletida

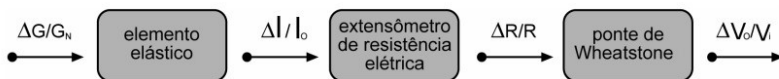


Fonte: Sanches (2007)

3.1.3 Projeto de design mecânico/elétrico do transdutor de força

Conforme visto anteriormente nos itens 3.1.1 e 3.1.2, o transdutor é composto de uma parte eletromecânica (extensômetro) e de uma parte estrutural mecânica (elemento mola). Aborda-se a seguir a junção destes dois tópicos para formar o transdutor de força (célula de carga – Figura 10).

Figura 10 – Diagrama de um transdutor de força



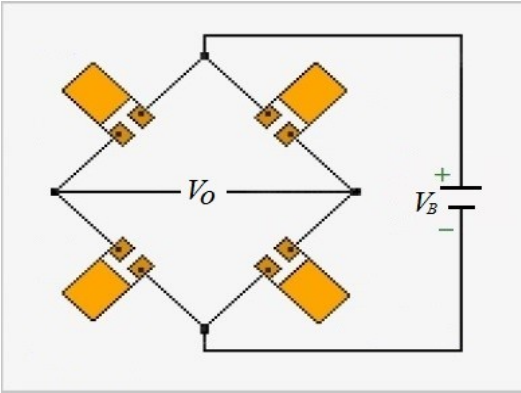
Fonte: Adaptado de Brusamarello (2009)

Segundo Brusamarello (2009), a escolha do transdutor consiste na determinação de uma combinação de parâmetros compatíveis com o ambiente e com as condições de operação do sensor. Por esse motivo, o autor ressalta algumas limitações físicas do extensômetro.

- A deformação máxima que pode ser medida com extensômetros do tipo folha, depende do comprimento do sensor, da liga, do material do substrato da grade e do adesivo utilizado. Limites típicos com substrato de poliamida orbitam entre $\pm 1,5\%$ a $\pm 5,0\%$, alguns de alto alongamento variam $\pm 20\%$ e extensômetros com substrato de poliamida de alto alongamento e adesivo epóxi modificado com uretano podem variar dimensões acima de $\pm 20\%$.
- O tamanho da grade deve ser a menor possível para se obter a tensão mecânica em um ponto, no entanto, optar por resistências elétricas maiores reduz o aquecimento da grade, das conexões e soldas.

Com base nas configurações existentes, constatou-se que a ligação dos extensômetros em ponte completa é a mais vantajosa e estável (Figura 11).

Figura 11 – Ponte Completa de *Wheatstone*



Fonte: Autor

No Quadro 4 pode-se observar a vantagem com relação à linearidade quando são utilizados quatro elementos ativos na ponte.

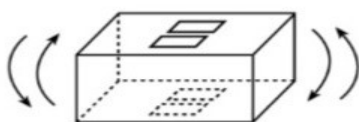
Quadro 4 – Número de Extensômetros X Linearidade

Excitação: Fonte de tensão				
$V_0 =$	$\frac{V_B}{4} \left[\frac{\Delta R}{R + \frac{\Delta R}{2}} \right]$	$\frac{V_B}{2} \left[\frac{\Delta R}{R + \frac{\Delta R}{2}} \right]$	$\frac{V_B}{2} \left[\frac{\Delta R}{R} \right]$	$V_B \left[\frac{\Delta R}{R} \right]$
Erro de linearidade	0,5%/%	0,5%/%	0	0
	1 elemento simples	Dois elementos	Dois elementos	Quatro elementos

Fonte: Brusamarello (2009)

Com intuito de possibilitar propagação homogênea (Figura 12) do calor liberado pelas grades dos extensômetros sugere-se a utilização de um elemento mola simétrico, associado a distribuição física proporcional do componente (extensômetros) sobre esse perfil metálico. Com isto, pode-se alcançar um percentual de estabilidade no funcionamento. Cabe entender que propagações oriundas da parte externa, por condução, poderão também influenciar, no entanto, o procedimento adotado (simetria) diminui o número de variáveis sobre o sistema.

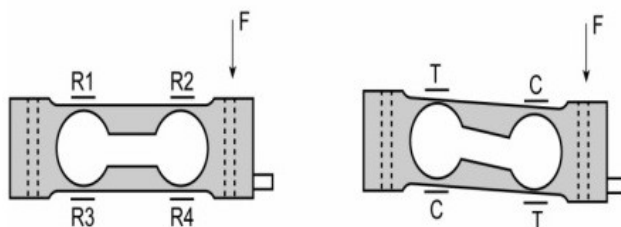
Figura 12 – Simetria térmica



Fonte: Autor

A utilização de uma viga em balanço/biengastada (fixa num único lado, em dois pontos) do tipo comumente conhecida como “Binocular” (Figura 13) permite ampliar a sensibilidade na aquisição de dados, em virtude de possibilitar a instalação de uma ponte completa de *Wheatstone*. A partir da força aplicada (F), observam-se as tensões de tração (T) e compressão (C) na viga.

Figura 13 – Tração e Compressão

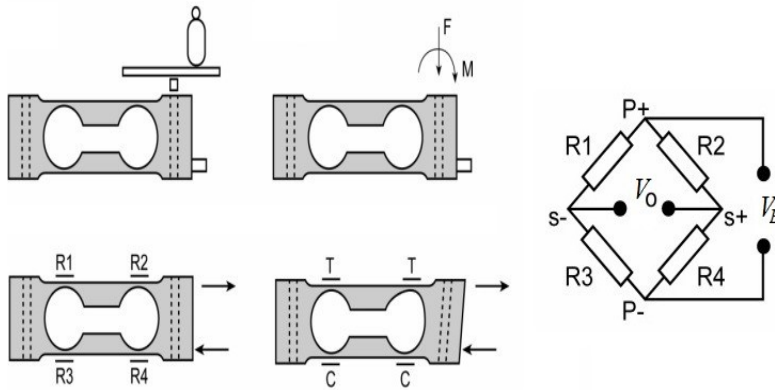


Fonte: Brusamarello (2009)

Os extensômetros são posicionados estrategicamente no elemento mola (Figura 13), de forma que a tensão mecânica sobre esse elemento resulte em aumento nas resistências elétricas, gerando um ganho positivo, se este incremento for em R1 e R4, e negativo se for em R2 e R3.

A definição do elemento mola em conjunto com a quantidade e o arranjo dos componentes ativos na ponte extensométrica tem papel importante no projeto, possibilitando suprimir forças indesejáveis durante o processo de coleta de dados. Conforme a Figura 14, pode-se observar que as forças axiais paralelas ao eixo longitudinal não são registradas, em virtude dos valores em R1 e R2 anularem-se com os valores em R4 e R3, respectivamente.

Figura 14 – Efeito do momento sobre uma viga em balanço/biengastada



Fonte: Adaptado de Brusamarello (2009)

Com a equação (3.12) calcula-se a tensão de flexão máxima para uma seção transversal retangular.

$$\sigma_{max} = \frac{6.F.l}{b.h^2} \quad (3.12)$$

Para cálculo das tensões elétricas resultantes, em função dos materiais utilizados (K , E), das dimensões configuradas (b , h , l) e da força aplicada (F), segundo Brusamarello (2009), segue a equação (3.13) e a Figura 15 como referência.

$$\frac{E_0}{E_{Fonte}} = \frac{6.K.l}{E.b.h^2} . F \quad (3.13)$$

K = Fator *Gauge* (Equação 3.1) adimensional

E = Módulo de elasticidade (Equação (3.5), (3.6) e (3.7) N/m²

F = Força (N)

b = Base (m)

h^2 = Altura ao quadrado (m²)

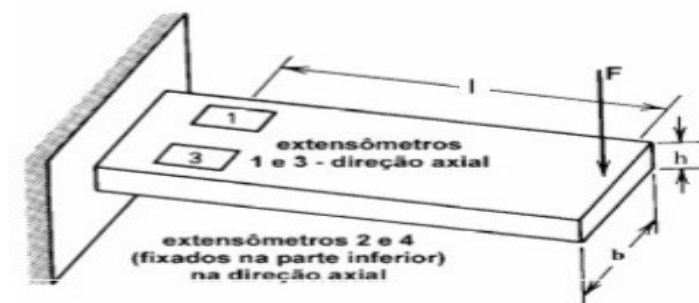
l = Comprimento (m)

Simplificando as unidades teremos somente a tensão de alimentação expressa em V e a tensão gerada pela saída da ponte expressa em mV .

$$\frac{E_0}{E_{Fonte}} = \text{expresso em: } mV/V$$

Na Figura 15 os extensômetros posicionados na parte superior estão equidistantes dos posicionados na parte inferior.

Figura 15 – Transdutor do tipo lâmina engastada



Fonte: Adaptado Brusamarello (2009)

Apresenta-se alguns critérios utilizados durante aquisição de uma célula de carga segundo o fabricante de transdutores de força MK Controle e Instrumentação (2015) e que podem nortear o desenvolvimento do projeto.

- Capacidade Nominal: força máxima que deverá medir com o fator de segurança implícito será de 50% de sobrecarga e de 300% para ruptura.
- Sensibilidade: a medição do desbalanceamento da ponte de *Wheatstone* é feita pela variação da tensão de saída em função da tensão de excitação aplicada na entrada da ponte. Quando a célula de carga está carregada, este valor é dado em milivolt por volt aplicado e, normalmente, encontra-se entre (2 e 3) mV/V.

Isso significa que uma célula de carga de 30 kgf de capacidade nominal e 2 mV/V de sensibilidade, com uma tensão de excitação na entrada de 10 V, quando sujeita a uma força de 30 kgf apresentará na saída uma variação de tensão de 20 mV.

- Precisão: é o erro máximo admissível relacionado em divisões da capacidade nominal. As células de carga podem ser divididas em:
 - baixa precisão, até 1.000 divisões (ou 0,1% da capacidade nominal);
 - boa precisão, de 3.000 a 5.000 divisões (ou 0,03 a 0,02% da capacidade nominal).
 O termo precisão é um conceito qualitativo para indicar o grau de concordância entre os diversos resultados experimentais obtidos em condições de repetibilidade (VIM, 2012).
- Formato: conforme a aplicação, determinados formatos são requeridos, exemplo: para a carga apoiada (células tipo viga), para a carga sustentada (célula tipo Z), ou ainda para a carga que introduz momentos torsores na célula (células tipo *single point*).
- Os extensômetros são colados a uma peça metálica (alumínio, aço ou liga cobre-berílio), denominada corpo da célula de carga (elemento mola) e inteiramente solidários à sua deformação. Portanto, a força que atua sobre o corpo da célula de carga produz deformação e esta é transmitida aos extensômetros, que por sua vez medem sua intensidade. A forma e as características do corpo da célula de carga devem ser objeto de intenso estudo, tanto no seu projeto quanto na sua execução, visando assegurar que a sua relação de proporcionalidade entre a intensidade da força atuante e a consequente deformação dos extensômetros seja preservada tanto no ciclo inicial de força quanto nos ciclos subsequentes, independentemente das condições ambientais. A forma geométrica, por conseguinte, deve conduzir a uma linearidade dos resultados.
- Um efeito normalmente presente ao ciclo de pesagem e que deve ser controlado com a escolha conveniente da liga da matéria-prima da célula de carga é o da histerese decorrente de trocas térmicas com o ambiente da energia elástica gerada pela deformação, o que acarreta que as medições de cargas sucessivas não coincidam com as descargas respectivas.
- Deve-se considerar também o fenômeno da fluência ou *creep*, que consiste na variação da deformação ao longo do tempo após

a aplicação da carga. Este efeito decorre de escorregamentos entre as faces da estrutura cristalina do material e apresenta-se como variações aparentes na intensidade da força sem que haja incrementos na mesma.

3.1.4 Sistema de calibração e teste para transdutor de força (célula de carga)

De acordo com Cauduro (1992), o projeto mecânico de um elemento pode ser realizado pelo projeto de suas dimensões e de seu material, por meio do cálculo de tensões e deformações. Esses devem estar dentro de um limite aceitável, caso contrário, necessitam alterações nas dimensões do material ou até mesmo no tipo de elemento elástico, até se obter uma relação de tensão e deformação satisfatória para a aplicação.

Para avaliação do desempenho de um transdutor de força, necessita-se de outro transdutor padrão ou de um sistema referencial que, sob a ação de uma grandeza mecânica, produza no transdutor em teste um sinal elétrico. Durante o uso de transdutores extensométricos erros diversos e perturbações podem surgir, como: erros do sistema de calibração, erros humanos (de leitura e procedimento), histerese, influência de temperatura, não linearidade e condições ambientais na realização do ensaio (temperatura e pressão).

A calibração de transdutores pode ser feita com Peso-Morto, multiplicações de Peso-Morto, cargas hidráulicas ou mecânicas.

A norma brasileira ABNT NBR ISO 6016:2010 padroniza os termos relativos a transdutores, cujos mais significativos são:

- sinal de saída: tensão (mV/V), corrente (mA/A) ou deformação ($\mu\text{m}/\text{m}$);
- curva de calibração: registro gráfico com os dados da calibração;
- não-linearidade: desvio máximo entre curva de calibração e a reta de referência, determinado somente com carga crescente. É expressa por uma porcentagem do sinal de saída nominal;
- histerese: diferenças máximas entre leituras do sinal de saídas do transdutor, na aplicação de grandezas mecânicas crescentes e decrescentes. É expressa por uma porcentagem do sinal de saída nominal;
- repetibilidade: diferença máxima entre sinais de saídas para aplicações de uma mesma grandeza, em iguais condições

ambientais e de aplicação de grandeza. É expressa por uma porcentagem do sinal de saída nominal;

- erro combinado: desvio máximo entre a reta de referência e a curva de calibração, englobando a não-linearidade, a repetibilidade e a histerese. É expresso por uma porcentagem do sinal de saída nominal;
- capacidade nominal: grandeza mecânica para a qual o transdutor foi dimensionado, e sob a qual trabalha sem danos dentro da faixa de segurança dimensional; e
- equilíbrio de zero: sinal de saída do transdutor com a excitação elétrica da ponte de *Wheatstone* recomendada e sem a ação de qualquer grandeza mecânica e é expresso por uma porcentagem do sinal de saída.

3.2 Condicionamento eletrônico

3.2.1 Condicionador

Neste projeto, o condicionador eletrônico para amplificação do desequilíbrio da ponte de *Wheatstone* é formado por um amplificador de instrumentação. Para Braga (2002), todos os tipos de amplificadores são usados em instrumentação, entretanto uma configuração particular recebe o nome de amplificador de instrumentação, para distingui-la de circuitos com amplificadores operacionais simples. As principais características desta configuração são: alta razão de rejeição em modo comum e impedância de entrada, deriva e ruído baixo, largura de faixa moderada e uma faixa de ganho limitada.

Quando se instala uma ponte extensométrica, provavelmente a mesma não apresentará zero volt em sua saída, mesmo na ausência de deformação. Pequenas diferenças de resistência entre os braços da ponte e as resistências dos cabos geram uma tensão de *offset* inicial diferente de zero. Há algumas formas para lidar com essa tensão de *offset* inicial, de acordo com a *National Instruments* (2013), o balanceamento e anulação de *offset* pode ocorrer por três métodos.

1. Compensação de software – o primeiro método compensa a tensão inicial por software. Por esse método, também conhecido como autozeragem, faz-se uma primeira medição antes de aplicar a entrada de deformação. Esse método é simples, rápido e não requer ajustes manuais. A desvantagem

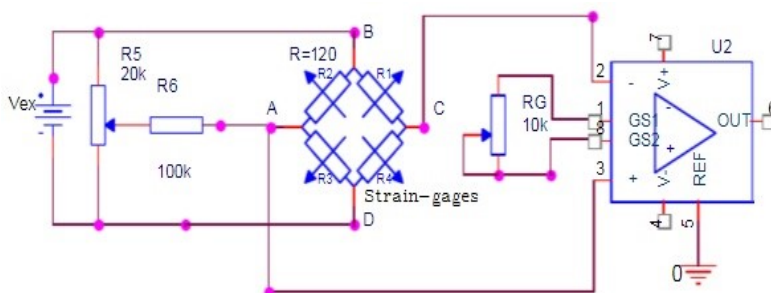
do método de compensação por software é que o *offset* da ponte não é eliminado. Se o *offset* for suficientemente grande, este limitará o ganho do amplificador que poderá ser aplicado à tensão de saída, limitando assim a faixa da medição.

2. Circuito de anulação do *offset* – o segundo método de balanceamento usa um resistor ajustável, ou potenciômetro, para acertar a saída da ponte em 0 V. Ajustando o potenciômetro, pode-se controlar o nível na saída da ponte – colocando-o em um valor inicial de 0 V.
3. Anulamento de *offset* com *buffer* – o terceiro método, da mesma forma que o método de software, não afeta diretamente a ponte. No anulamento com *buffer*, um circuito de anulação soma uma tensão CC (corrente contínua) ajustável à saída do amplificador de instrumentação.

Para Fialho (2002), durante a operação do circuito do condicionador, quando em ponte de *Wheatstone*, dois procedimentos podem ser executados para medir o desequilíbrio da ponte.

1. Método de Zeramento: um dos braços da ponte é ajustado manualmente até se alcançar a condição de equilíbrio. Na Figura 16 pode-se observar que o potenciômetro (R5) está encarregado de ajustar o zero da ponte, enquanto o potenciômetro (RG) ajusta o ganho do amplificador de instrumentação.
2. Método de Deflexão: o desequilíbrio da ponte é medido diretamente (necessita-se de um voltímetro com alto índice de repetibilidade e uma fonte de excitação muito estável).

Figura 16 – Diagrama básico de amplificação



Fonte: Adaptado de Braga (2002)

Para um sistema embarcado com restrições para massa e volume, o amplificador de instrumentação deve possuir características específicas, como: possibilitar a alimentação de energia com uma única tensão (assimétrica), ter baixa corrente quiescente (pequeno consumo em repouso), necessitar de baixa corrente de polarização (bias) e alta Razão de Rejeição em Modo Comum (CMRR), comumente definida, de acordo com Malvino (1995), como a razão entre o ganho de modo diferencial e o ganho de modo comum.

3.3 Acelerometria

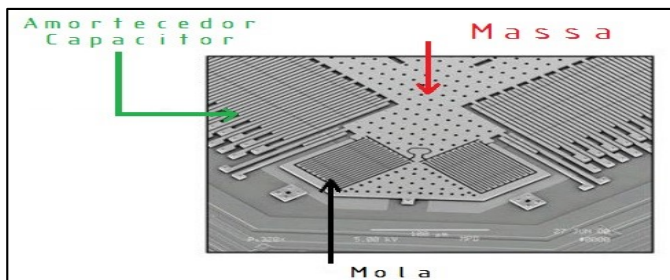
3.3.1 Acelerômetro

Os acelerômetros medem a aceleração de forma indireta, ou seja, uma massa, dentro do acelerômetro, quando este é acelerado fica submetida a uma força inercial que pode então ser medida (TORMENA, 2010). A unidade apropriada para a medida da aceleração é metros por segundo ao quadrado (m/s^2).

Sistema Micro Eletromecânico ou *MEMS* (Micro-Electro-Mechanical System) foi o termo criado no fim dos anos 80 nos Estados Unidos para descrever sistemas miniaturizados compostos basicamente de um sensor, que insere informações no sistema, um circuito eletrônico que trata o sinal do sensor e um atuador que responde ao sinal gerado pelo circuito eletrônico (BEEBY et al., 2004).

O estudo de Roylance e Angell (1979) descreve o primeiro acelerômetro *MEMS* que deu início à pesquisa de sensores inerciais microfabricados. Os acelerômetros *MEMS* possuem o mesmo princípio básico dos acelerômetros discretos, são basicamente um sistema massa, mola e amortecedor, mas em uma escala muito reduzida (Figura 17).

Figura 17 – Fotografia microscópica de um acelerômetro *MEMS*



Fonte: Adaptado de Acar e Shkel (2003)

Conforme Oliveira Neto (2008), para compreender como funciona a dinâmica desse sistema, que tem como base a segunda lei de Newton, deve-se analisar separadamente as quatro forças que compõem a resultante (F).

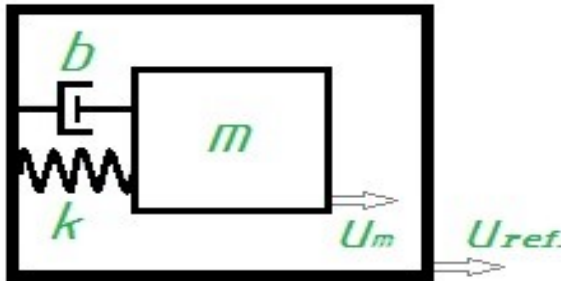
- 1- A força peso, que sempre atua para baixo.
- 2- A força restauradora da mola, que é proporcional ao alongamento total, e sempre atua no sentido de reestabelecer a posição original da mola.
- 3- A força resistiva ou de amortecimento, que sempre atua na direção oposta à direção do movimento e é devida às propriedades do meio (atrito, resistência do ar, viscosidade) ou fruto da utilização de algum dispositivo absorvedor de choques, denominado amortecedor.
- 4- Uma força externa, que dá origem ao fenômeno também conhecido como Oscilador Harmônico Fechado e que pode ser representado matematicamente por uma equação diferencial linear de segunda ordem, conforme apresentação clássica (3.14).

$$m \cdot \frac{d^2u}{dt^2} + b \cdot \frac{du}{dt} + k \cdot u = F(t) \quad (3.14)$$

Transportando o princípio explicado pela física para a representação conceitual do acelerômetro, temos: uma massa (m), conectada a uma referência por meio de uma mola com constante elástica (k) e um amortecedor com coeficiente de amortecimento (b), conforme a Figura 18.

Devido a resistência que um corpo oferece à alteração do seu estado de repouso/movimento, o movimento da massa (m) não será exatamente o mesmo da referência, assim, é possível usar essa diferença de posição ($U = U_{ref} - U_m$) para medir a aceleração.

Figura 18 – Representação conceitual de um acelerômetro



Fonte: Adaptado de Kaajakari (2009)

Os acelerômetros são classificados conforme o tipo de transdutor utilizado e os mais conhecidos são:

piezoresistivos – as suas molas utilizam material piezoresistivo, possibilitando medir a variação da resistência com o movimento e assim deduzindo a aceleração;

capacitivos – a massa fica localizada entre duas placas paralelas formando assim dois capacitores, então a aceleração pode ser medida de acordo com a capacitância entre as placas que varia com a posição da massa; e

piezoelétricos – existe um cristal piezoelétrico preso à massa. Quando há uma aceleração no sistema, o deslocamento da massa gera uma deformação no cristal e este movimento gera um sinal elétrico. A grande vantagem em se utilizar um transdutor piezoelétrico é a larga banda de frequência que esses dispositivos possuem (BEEBY et al., 2004).

3.3.2 Módulo sensor

São características importantes do sensor para o projeto:

1. tensão de alimentação e consumo de energia compatível com o restante do sistema;
2. resolução e sensibilidade de acordo com as necessidades do projeto;
3. interface de comunicação compatível com o sistema de processamento de dados; e
4. quantidade mínima de componentes externos.

3.3.3 Cálculos do acelerômetro

Embora o fabricante do componente forneça os dados de desempenho, pode-se também desenvolver os cálculos a partir do sistema montado. O valor RMS abordado é traduzido como “*Root Mean Square*” ou valor médio quadrático. Em um sinal senoidal equivale a $\sqrt{2}/2$ ou aproximadamente 70% do valor de pico de um sinal. Para Bissell e Chapman (1992) o valor RMS de um sinal pode ser calculado como:

$$r_{rms} = \sqrt{\bar{r}^2 + \sigma_r^2} \quad (3.15)$$

Onde (r_{rms}) é o valor rms do sinal, (\bar{r}) é o valor médio do sinal e (σ_r) o seu desvio padrão. O desvio padrão é definido como:

$$\sigma_r = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (r_i - \bar{r})^2} \quad (3.16)$$

Sendo o somatório dos valores da variável (r_i) começando do primeiro ($i=1$) e terminando no enésimo ($i=n$).

Com o acelerômetro estático, pode-se concluir que o ruído será o sinal coletado menos a sua média, logo, o ruído possui valor médio igual a zero e a equação (3.18) se reduz a:

$$r_{rms} = \sigma_r \quad (3.17)$$

4 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Neste capítulo estão apresentados os procedimentos metodológicos utilizados para elaborar a construção da instrumentalização.

Descreve a estrutura de decomposição do projeto, as atividades e características, o sequenciamento das atividades em etapas, a nova distribuição das atividades dentro das etapas e, por fim, o resultado da execução das atividades.

4.1 Classificação da pesquisa

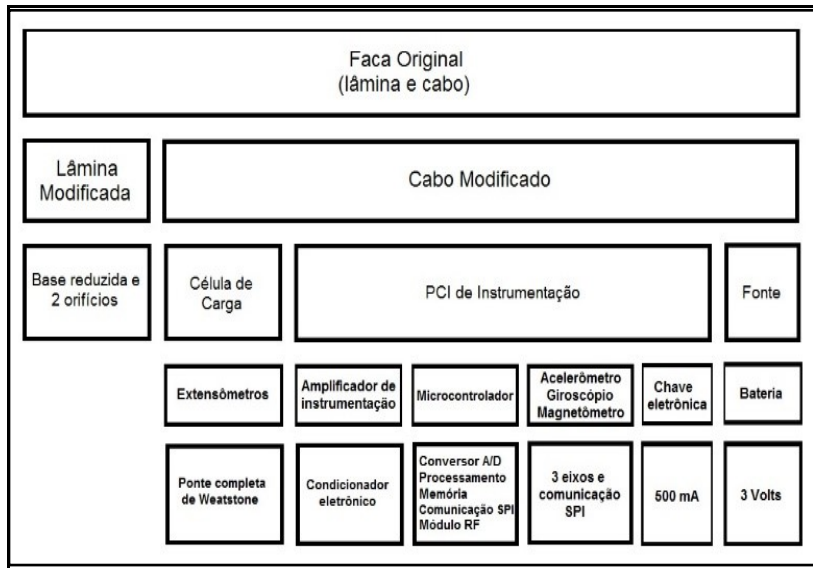
Com base em alguns autores o enquadramento desta pesquisa é:

- do ponto de vista da sua natureza – **Pesquisa aplicada**: objetiva gerar conhecimentos para aplicação prática dirigido à solução de problemas específicos (GIL, 2002);
- do ponto de vista da forma de abordagem – **Pesquisa quantitativa**: considera que tudo pode ser quantificável, o que significa traduzir em números opiniões e informações para classificá-las e analisá-las (GIL, 2002);
- quanto aos fins – **Pesquisa metodológica**: o estudo que se refere a elaboração de instrumentos de captação ou de manipulação da realidade (MORESI, 2003); e
- quanto aos meios de investigação – **Pesquisa de laboratório**: é a experiência realizada em local circunscrito, já que no campo seria praticamente impossível realizá-la (MORESI, 2003).

4.2 Proposta de instrumentalização

Pretende-se modificar a estrutura interna (cabo) da ferramenta faca utilizada nos frigoríficos. De acordo com a Figura 19 podem-se observar, de forma simplificada, as modificações e os módulos que serão inseridos.

Figura 19 – Proposta de modificação



Fonte: Autor

4.3 Roteiro de pesquisa

Método: a abordagem inicial é a definição das etapas com suas atividades e características, de acordo com a Estrutura de Decomposição do Projeto da Figura 20.

Etapas – Faca, Célula de Carga, PCI, Bateria, Firmware, Transceptor e Software.

Figura 20 – Estrutura de Decomposição do Projeto (EDP)



Fonte: Autor

4.4 Atividades

4.4.1 Atividades relacionadas com o instrumento Faca

1. Pesquisar os modelos de facas (tamanho, massa e formato de cabo) utilizadas para a desossa nos frigoríficos.
2. Pesquisar força máxima aplicada sobre o cabo em relação a lâmina.
3. Selecionar um tipo de modelo para abrigar o protótipo (utilizar modelo certificado *NFS[®]*).
4. Adquirir unidades do modelo selecionado.
5. Desmontar lâmina do cabo.
6. Pesar cabo e lâmina separadamente.
7. Digitalizar o formato externo do cabo.
8. Gerar um sólido do formato do cabo.
9. Adquirir material (bloco de polipropileno, observar cor) para usinagem do cabo do protótipo.
10. Definir formato interno do cabo considerando as reentrâncias necessárias para fixação da célula de carga, da placa de circuito impresso (PCI) de instrumentação, da bateria de alimentação e do modo de carregamento da bateria, considerar também a estanqueidade.
11. Usinar bloco (interno e externo).

4.4.2 Atividades relacionadas com a Célula de Carga

1. Definir esboço primário da célula de carga.
2. Gerar um sólido do formato da célula de carga.
3. Definir formato interno da célula de carga em função da força máxima admitida.
4. Escolher material para célula de carga (alumínio ou aço), analisar restrições: massa; força máxima admitida e dimensões.
5. Definir tipo de liga e têmpera do metal selecionado para a célula de carga.
6. Analisar ancoragem da lâmina da faca na célula de carga (estudo da alavanca interpotente): observar a necessidade de cortar e furar a lâmina (respectivamente para diminuir a massa e auxiliar fixação – aplicar ABNT PB-50 1).
7. Analisar ancoragem da célula de carga no cabo da faca (observar cisalhamento).
8. Definir dimensões definitivas da célula de carga.

9. Adquirir chapa do metal selecionado.
10. Usinar chapa de metal conforme desenho da célula de carga.
11. Escolher o tipo de extensômetro: material da base; tamanho ativo da grade e resistência ôhmica, considerar: tipo de metal selecionado para a célula de carga; sensibilidade mínima e consumo de energia.
12. Adquirir os extensômetros selecionados.
13. Executar processo de colagem dos extensômetros na célula de carga (tratamento do material (água deionizada, ácido acético e lixa N°600), alinhamento dos extensômetros e colagem (cianocrilato).
14. Soldar os microfios de cobre esmaltado: dos extensômetros até a PCI de conexão.
15. Aplicar camada protetora sobre os extensômetros (borracha termoplástica líquida).
16. Definir dimensões da PCI de conexão (suporte mecânico), confeccioná-la e fixa-la na célula de carga.

4.4.3 Atividades relacionadas com a PCI de Instrumentação

1. Desenvolver condicionador eletrônico para amplificação dos sinais da célula de carga com a produção do diagrama elétrico.
2. Aplicar o método de zero (método de oposição em um dos ramos da ponte, seguido de um filtro digital implementado via *firmware* no microcontrolador (média aritmética móvel)).
3. Escolher amplificador de instrumentação, considerar: tensão de alimentação assimétrica; encapsulamento SMD; baixa corrente quiescente; baixa tensão de *drift*; alta razão de rejeição em modo comum – CMRR (90 dB ou 32 vezes conforme (LUCA, 2003); baixa corrente de excitação (Bias) e ganho.
4. Definir o modelo do módulo acelerômetro com a produção do diagrama elétrico.
5. Escolher sensor com três eixos, considerar: elemento sensorial, cristal de *clock* embutido; tensão de alimentação; encapsulamento SMD; baixa corrente quiescente; porta SPI de comunicação; resolução; sensibilidade; faixa de trabalho (*range*); modo de detecção de queda-livre e modo de detecção de movimento.
6. Desenvolver sistema de processamento de sinais com a produção do diagrama elétrico.

7. Escolher microcontrolador, considerar: arquitetura, tamanho da palavra de instrução e *clock* de funcionamento; alimentação; encapsulamento SMD; baixa corrente quiescente; resolução do conversor A/D (análogo-digital); quantidade de portas SPI; núcleo de RF embutido (*transceiver*) e frequência da portadora; quantidade de modos de operação em baixo consumo; suporte a UART (recepção/transmissão universal assíncrona); facilidade na programação (firmware) via módulo externo; quantidade de portas I/O; capacidade da memória *flash* programável; capacidade da memória RAM e conversor A/D interno para temperatura e tensão de alimentação.
8. Definir lóbulos de propagação do sinal de radiofrequência e analisar necessidade de amplificação externa (*booster*) para transmissão de RF (utilizar: RIOS, 1987; SMIT, 1992).

4.4.4 Atividades relacionadas com a Alimentação Elétrica

1. Definir o sistema de energia elétrica e escolher tipo de bateria, considerar: massa; dimensões; tensão; carga de dreno e carga total.
2. Definir modo de carregamento e acesso à bateria quando instalada no compartimento cabo.

4.4.5 Atividades relacionadas com o Software Embarcado

1. Desenvolver firmware, com identificação e definição de requisitos.
2. Codificar a solução (algoritmo).
3. Implementar na linguagem “C”.
4. Verificar e testar (depuração).

4.4.6 Atividades relacionadas com o Transceptor USB

1. Pesquisar módulo que permita a recepção de uma portadora de RF e realize a conexão com uma porta USB.

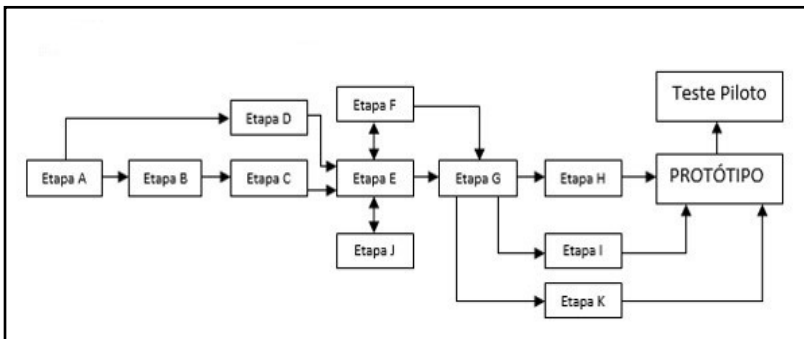
4.4.7 Atividades relacionadas com o Software de Comunicação/Dados (microcomputador)

1. Desenvolver interface para comunicação e aquisição de dados procedentes do módulo remoto.

4.5 Sequenciamento das etapas

A descrição até este momento vislumbra as ações necessárias para o desenvolvimento do projeto, no entanto, necessitam de uma redistribuição para contemplar o sequenciamento e a interdependência das ações dentro de cada etapa, bem como, a inter-relação e a hierarquia entre elas. Nesta nova abordagem a Figura 21 apresenta esse sequenciamento.

Figura 21 – Fluxo de desenvolvimento



Fonte: Autor

Cabe salientar que o implemento da etapa *C* requer dados da etapa *B*, a qual tem suas dimensões externas (célula de carga) limitada pelo volume máximo admitido para o cabo da faca. As etapas *F* e *J* são interdependentes com a etapa *E*, a qual necessita considerar padrões de comunicação e níveis de alimentação. Apresenta-se a seguir esta nova distribuição:

Etapa A – Faca

1. Pesquisar os modelos de facas (tamanho, massa e formato de cabo) utilizadas para a desossa nos frigoríficos.
2. Pesquisar força máxima aplicada sobre o cabo em relação a lâmina.
3. Selecionar um tipo de modelo para abrigar o protótipo.
4. Adquirir unidades do modelo selecionado.
5. Desmontar lâmina do cabo.
6. Pesar cabo e lâmina separadamente.
7. Digitalizar o formato externo do cabo.

8. Gerar um sólido do formato do cabo.
9. Adquirir material (bloco de polipropileno, observar cor) para usinagem do cabo do protótipo.

Etapa B – Célula de Carga

1. Definir esboço primário da célula de carga.
2. Gerar um sólido do formato da célula de carga.
3. Definir formato interno da célula de carga em função da força máxima admitida.
4. Escolher material para célula de carga (alumínio ou aço), analisar restrições: massa; força máxima admitida e dimensões.
5. Definir tipo de liga e têmpera do metal selecionado para a célula de carga.
6. Analisar ancoragem da célula de carga no cabo (observar cisalhamento).
7. Definir dimensões definitivas da célula de carga.
8. Adquirir chapa do metal selecionado.
9. Usinar chapa de metal conforme desenho da célula de carga.
10. Analisar ancoragem da lâmina na célula de carga (observar a necessidade de cortar e furar a espiga da lâmina).
11. Escolher o tipo de extensômetro: material da base; tamanho ativo da grade e resistência ôhmica, considerar: tipo de metal selecionado para a célula de carga; sensibilidade mínima e consumo de energia.
12. Adquirir os extensômetros selecionados.
13. Executar o processo de colagem dos extensômetros na célula de carga.
14. Definir dimensões da PCI de conexão, confeccioná-la e fixá-la na célula de carga.
15. Soldar os microfios de cobre esmaltado: dos extensômetros até a PCI de conexão.
16. Aplicar camada protetora sobre os extensômetros.

Etapa C – Condicionador Eletrônico

1. Desenvolver o condicionador eletrônico para amplificação dos sinais da célula de carga (diagrama elétrico).
 - 1.1 Aplicar o método de zero (método de oposição em um dos ramos da ponte, seguido de um filtro digital implementado via firmware no microcontrolador).

- 1.2 Escolher amplificador de instrumentação, considerar: tensão de alimentação assimétrica; encapsulamento SMD; baixa corrente quiescente; baixa tensão de *drift*; baixa relação de rejeição em modo comum – CMRR; baixa corrente de excitação (Bias) e ganho.

Etapa D – Sensor de Posicionamento

1. Definir o modelo do módulo acelerômetro (diagrama elétrico).
 - 1.1 Escolher sensor com três eixos, considerar: elemento sensorial, cristal de *clock* embutido; tensão de alimentação; encapsulamento SMD; baixa corrente quiescente; porta SPI de comunicação; resolução; sensibilidade; faixa de trabalho (*range*); modo de detecção de queda-livre e modo de detecção de movimento.

Etapa E – Processamento de Sinais

1. Desenvolver o sistema de processamento de sinais (diagrama elétrico).
 - 1.1 Escolher microcontrolador, considerar: arquitetura, tamanho da palavra de instrução e *clock* de funcionamento; alimentação; encapsulamento SMD; baixa corrente quiescente; resolução do conversor A/D; quantidade de portas SPI; núcleo de RF embutido (*transceiver*) e frequência da portadora; quantidade de modos de operação em baixo consumo; suporte a UART; facilidade na programação (firmware) via módulo externo; quantidade de portas I/O; capacidade da memória *flash* programável; capacidade da memória RAM e conversor A/D interno, para temperatura e tensão de alimentação (Ref: *Analog Device* e *Texas Instruments*).
 - 1.2 Definir lóbulo de propagação do sinal de radiofrequência; analisar necessidade de amplificação externa (*booster*) para transmissão de RF.

Etapa F – Sistema de Energia

1. Definir o sistema de energia elétrica.
 - 1.1 Escolher tipo de bateria, considerar: massa; dimensões; tensão; carga de dreno; carga total.

- 1.2 Definir modo de carregamento e acesso à bateria quando instalada no compartimento cabo.

Etapa G – PCI

1. Desenvolver PCI de instrumentação, composta de leiaute dos componentes e diagramas oriundos das etapas *C*, *D*, *E* e *F*.

Etapa H – Cabo

1. Construir formato interno do cabo considerando as reentrâncias necessárias para fixação da célula de carga, da PCI de instrumentação, da bateria de alimentação e do modo de carregamento da bateria, considerar também a estanqueidade.
2. Usinar bloco (interno e externo).

Etapa I – Firmware

1. Desenvolver programa computacional
 - 1.1 Identificação e definição de requisitos.
 - 1.2 Codificar a solução (algoritmo).
 - 1.3 Implementar na linguagem “C”.
 - 1.4 Verificar e testar (depuração).

Etapa J – RF

1. Pesquisar módulo que permita a recepção de uma portadora de RF e realize a conexão com uma porta USB.

Etapa K – Software

1. Desenvolver interface para comunicação e aquisição de dados procedentes do módulo remoto.

4.6 Execução das atividades com os resultados das etapas

Etapa A

Na pesquisa para definir qual modelo de faca seria utilizado para receber a instrumentação, chegou-se a dois fabricantes de grande porte que fornecem ferramentas para a desossa em frigoríficos e que possuem

a certificação NSF, de acordo com o referencial teórico (Cap. 2.3) são eles: Tramontina e Mundial.

Nos manuais técnicos dos fabricantes buscou-se encontrar um modelo de faca que atendesse a três quesitos:

- o processo de desossa em geral;
- aos tipos de carnes (aves, suínos e bovinos); e
- a menor área de contato da haste com o cabo da faca, visto a necessidade de estanqueamento do cabo em relação a lâmina, o que interfere diretamente na força exercida sobre o transdutor (célula de carga).

De acordo com o referencial teórico (Cap. 2.9) a força máxima exigida sob a lâmina pode chegar a 30 N (3,05 kgf).

Após pesquisa chegou-se a dois modelos de facas que atendem aos quesitos anteriormente mencionados.

- O modelo 24635 da Tramontina. Uma faca estreita usada para diversas operações de desossa. As de 5" e 6" de comprimento de lâmina são usadas na desossa de suínos e bovinos.
- O modelo 5513 da Mundial com 6" de tamanho de lâmina facilita a retirada da carne junto ao osso, lâmina estreita e flexível.

Em virtude da facilidade de aquisição no mercado consumidor, o modelo 24635 da Tramontina com 6" de comprimento foi a faca adquirida para abrigar o projeto. Conforme Figura 22.

Figura 22 – Embalagem com modelo em destaque



Fonte: Autor

Para levantar as especificações de massa da ferramenta “faca”, utilizou-se uma balança eletrônica digital, com capacidade para 3 Kg e resolução de 1 grama, com zero automático e função “tara”, de origem italiana, sob a marca SGS e modelo EQU0031 (Figura 23).

Figura 23 – Pesando a faca



Fonte: Autor

Cabe registrar que, este modelo de acordo com o fabricante deveria pesar 85 gramas. Pode-se perceber na Figura 25, no círculo em destaque, que durante o processo de injeção plástica alguns pontos não foram totalmente preenchidos, o que pode ocasionar uma variação de massa.

Desmontando a lâmina do cabo em uma bancada com morsa e serra manual (Figura 24).

Figura 24 – Serrando o cabo



Fonte: Autor

Figura 25 – Espiga da lâmina aparente



Fonte: Autor

Conforme se explicita a seguir, por exclusão (Figura 26) sabe-se que o cabo original (Figura 27) pesa 55 gramas (91 g – 36 g).

Figura 26 – Pesando a lâmina



Fonte: Autor

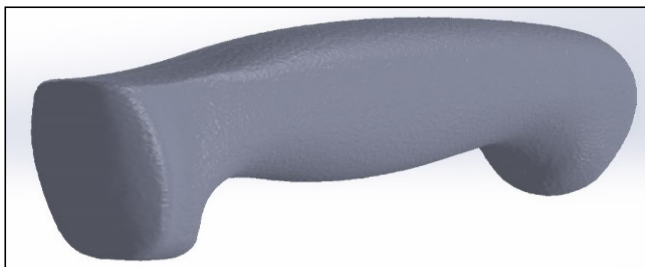
Figura 27 – Cabo original



Fonte: Autor

Para o escaneamento do cabo foi utilizado um Sistema de Digitalização 3D DAVID SLS-3, que utiliza tecnologia de luz estruturada e sintetiza o volume externo do cabo em uma nuvem de pontos, chegando ao formato externo do cabo digitalizado (Figura 28).

Figura 28 – Modelo do cabo digitalizado

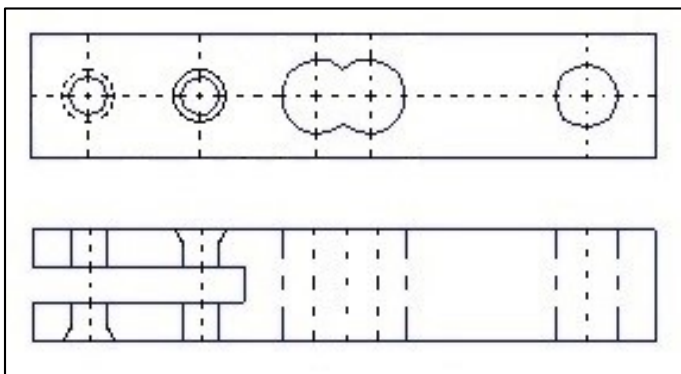


Fonte: Autor

Etapa B

Considerando a necessidade do formato simétrico do transdutor, na tentativa de manter a propagação interna de calor homogênea e em equilíbrio o centro de gravidade, apresenta-se na Figura 29 um esboço primário da célula de carga.

Figura 29 – Esboço inicial da estrutura mecânica da célula de carga



Fonte: Autor

Para definir a menor espessura da parede da célula de carga deve-se considerar, a força máxima que o elemento mola admite sem sair da

região elástica, porém, respeitando os limites de deformação do extensômetro, conforme indica o fabricante.

Os valores a seguir servem para os cálculos com as equações (3.7), (3.12) e (3.13).

- Admitindo a deformação no extensômetro de $\pm 5\%$, onde a base possui 6 mm (0,006 m) tem-se $\pm 300 \mu\text{m}$ deformações (0,0057 m até 0,0063 m).
- Estipulando a tensão mecânica de sobrecarga (conforme indica fabricante de célula de carga) em 50% sobre o valor requerido (30 N), tem-se 45 N.
- A distância entre o centro dos dois parafusos que ancoram a lâmina e o centro do extensômetro mais próximo do interior do cabo, define $l = 18 \text{ mm}$ (0,018 m). Adotou-se a mesma posição da ancoragem da espiga em relação ao cabo, da faca original, para este projeto.

Especificações dos materiais utilizados.

Fator *Gauge* (extensômetro): $K = 2,15 (\pm 1\%)$

Módulo de elasticidade longitudinal (estrutura alumínio): $E = 72,470 \text{ GPa}$

Módulo de elasticidade tangencial (estrutura alumínio): $G = 27,041 \text{ GPa}$

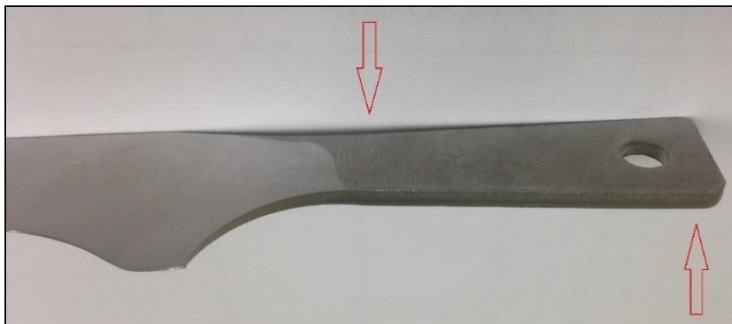
Coefficiente de *Poisson* (estrutura alumínio): $\mu = 0,340$

Em virtude de pouca massa que se deve incluir na parte interna do cabo, o material escolhido para composição mecânica da célula de carga foi a liga de alumínio 7075 e a têmpera T6. Conforme a fabricante Alcoa, esta composição possui a maior resistência dentre todas as ligas de alumínio e a têmpera utilizada apresenta tensão de escoamento de 572 MPa (ALCOA, 2010). Um fator preponderante para a escolha desta liga está na composição química do material, que permite a permanência na região elástica durante a sua utilização neste projeto.

Após analisar a ancoragem da espiga da lâmina no cabo da faca original, calculou-se a área de contato desta com o cabo. Considera-se que, quando em uso normal da ferramenta, o fulcro com maior intensidade de pressão são as extremidades da diagonal da espiga (Figura 30).

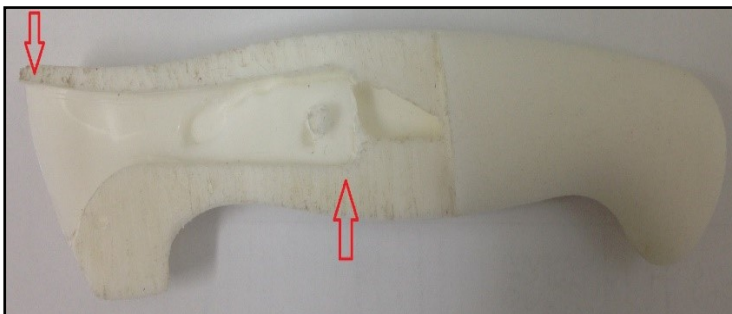
Cada face superior/inferior da espiga possui 180 mm^2 (60 mm x 3 mm) de área de contato com o cabo (Figura 31).

Figura 30 – Forças atuantes sobre a espiga durante etapa normal de corte



Fonte: Autor

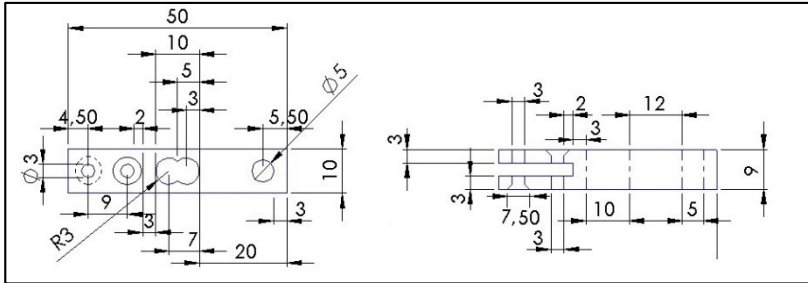
Figura 31 – Locais de maior esforço



Fonte: Autor

Após abordar as variáveis necessárias para definir as medidas internas e externas da célula de carga, a Figura 32 apresenta todas as cotas, considerando a força máxima admitida durante o uso, o tipo de material metálico empregado para desenvolvimento do transdutor, a fixação da espiga da lâmina na célula de carga, o tipo de extensômetros e a máxima área encontrada disponível (180 mm^2 ($20 \text{ mm} \times 9 \text{ mm}$)), para ancoragem da célula de carga no cabo modificado.

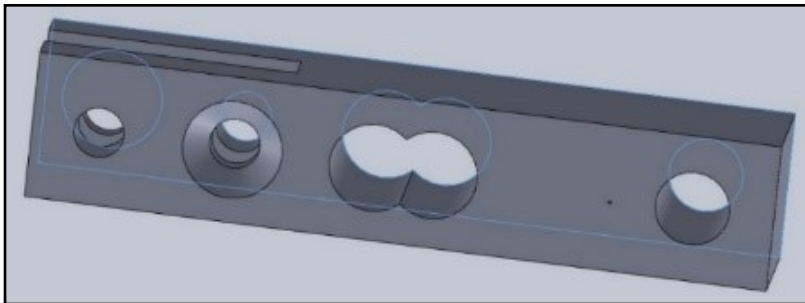
Figura 32 – Vista lateral e superior com cotas



Fonte: Autor

O modelo em 3D gerado pelas medidas do projeto pode ser observado na Figura 33.

Figura 33 – Célula de Carga virtual



Fonte: Autor

Estrutura mecânica da célula de carga finalizada conforme projeto (Figura 34).

Figura 34 – Protótipo com roscas e parafusos



Fonte: Autor

Vale lembrar que a célula de carga possui chanfros alternados em lados opostos, o que permite o perfeito assentamento das cabeças dos parafusos.

Durante análise das modificações necessárias (corte e furação) na espiga da lâmina para ancoragem na célula de carga, pode-se observar, conforme as Figuras 35, 36 e 37, o quanto de material foi retirado para admitir o encaixe no centro da célula.

Figura 35 – Comparando tamanhos da célula de carga x espiga



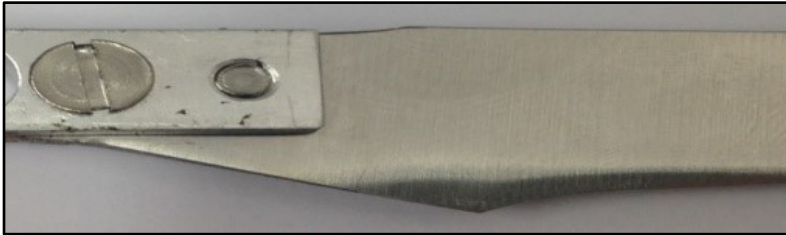
Fonte: Autor

Figura 36 – Célula de carga sobreposta à espiga para identificar modificações



Fonte: Autor

Figura 37 – Espiga modificada e ancorada na célula de carga



Fonte: Autor

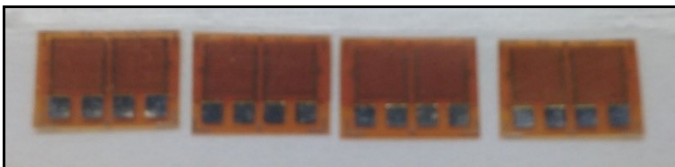
Com relação ao material de base do extensômetro, onde fica a grade, ele está restrito ao material metálico escolhido, neste caso, o alumínio.

No que diz respeito à sensibilidade mínima requerida, o fator limitante é a espessura do cabo, considerando ainda a resistência mecânica que este deverá possuir durante a pega do usuário, poucos milímetros estão disponíveis para abrigar o transdutor célula de carga.

O modelo que atendeu às necessidades possui dupla grade (Figura 38), o que permite capturar maior área de trabalho (Figura 39), aumentando a intensidade do sinal produzido.

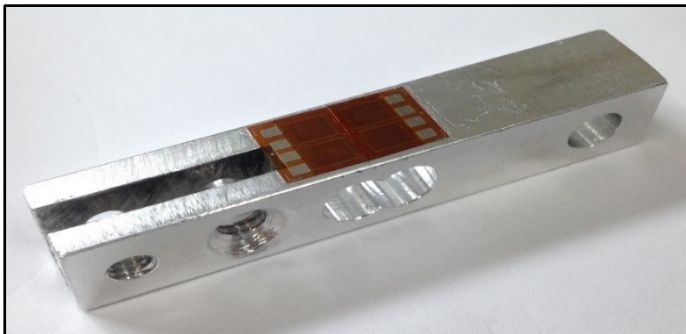
No que concerne ao consumo de energia elétrica, o modelo apresentado possui resistência de $1\text{ k}\Omega$ cada, o que permite configuração elétrica com as grades em série ($2\text{ k}\Omega$ – Figura 40), possibilitando redução no consumo.

Figura 38 – 4 Extensômetros duplos que integram a célula de carga



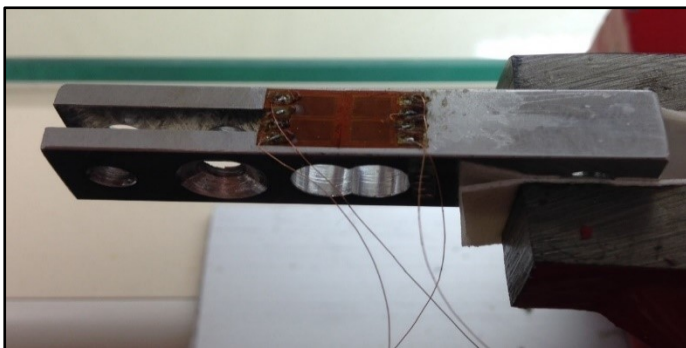
Fonte: Autor

Figura 39 – Célula de carga com extensômetros



Fonte: Autor

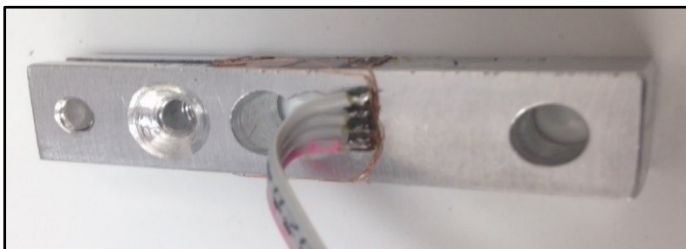
Figura 40 – Célula de carga com os microfios (esmaltados) soldados



Fonte: Autor

Na Figura 41 apresenta-se a ancoragem mecânica dos microfios na célula de carga.

Figura 41 – Célula de carga com a PCI de ancoragem



Fonte: Autor

Na Figura 42 apresenta-se a aplicação da camada de borracha líquida para proteção.

Figura 42 – Célula de carga com camada de proteção

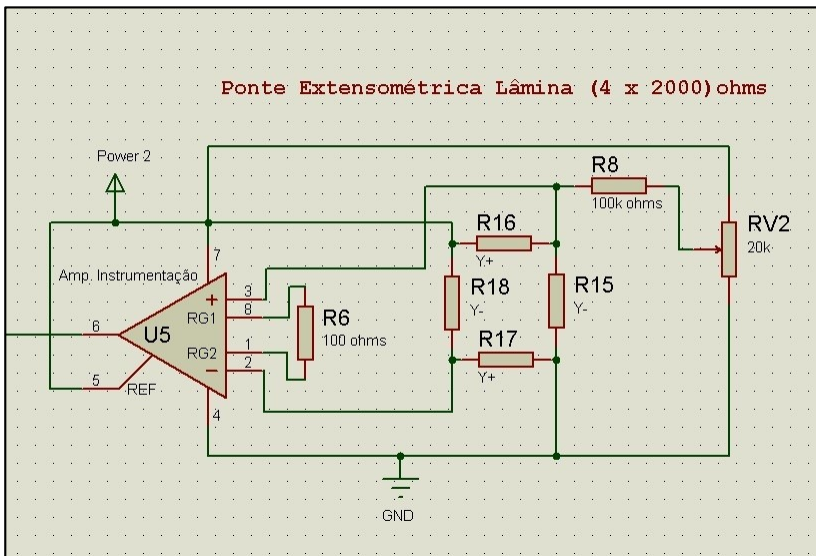


Fonte: Autor

Etapas C, D e E

Apresenta-se o diagrama elétrico da instrumentação com seus componentes (Figura 43 e 44).

Figura 43 – Diagrama elétrico do amplificador de instrumentação



Fonte: Autor

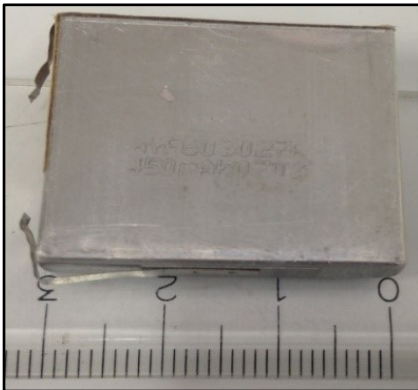
Fonte: Autor



Etapa F

Sistema de fonte de energia e respectivo carregamento: o modelo adquirido de bateria fornece 3,7 V com 1100 mA de densidade de corrente armazenada e corrente de dreno de 50 mA (Figura 45). A seleção considerou primeiramente o volume ocupado pela bateria no interior do cabo (30 mm x 27 mm x 6 mm). O fator de imperceptibilidade que esta instrumentação deve possuir (sem conectores e tomadas), levou a escolha do carregamento de bateria por indução, aliado à estanqueidade que a ferramenta necessita.

Figura 45 – Bateria de polímero de lítio



Fonte: Autor

Para não desperdiçar tempo com o projeto e produção de soluções já entregues pelo mercado de comércio eletrônico, optou-se em utilizar um carregador sem fio (indução – transmissor/receptor – Figura 46 e 47) e regulador automático de tensão/corrente para baterias de íon de lítio, disponível na rede mundial de computadores. De acordo com os fabricantes asiáticos, os circuitos trabalham com os seguintes valores (Quadro 5 e 6).

Quadro 5 – Dados do receptor da fonte de alimentação

Modelo Carregador Interno	WC-RM01
Tensão/Corrente de entrada	(5 a 8) V e 1 A
Tensão/Corrente de saída	5 V e 1 A

Fonte: Sichuan Junhengtai Electronic (2015)

Figura 46 – Carregador interno por indução (receptor)



Fonte: Adaptado de Sichuan Junhengtai Electronic (2015)

Quadro 6 – Dados do transmissor da fonte de alimentação

Modelo Carregador Externo	MC-02A
Conexão Micro USB	
Tensão/Corrente de entrada	5 V e 2 A
Sem fio (c/ distância máxima de 6 mm)	
Tensão/Corrente de saída	5 V e 1 A

Fonte: Shenzhen Kway Commerce Co. (2015)

Figura 47 – Carregador externo (transmissor)



Fonte: Shenzhen Kway Commerce Co. (2015)

Para regular automaticamente a tensão e a corrente durante o carregamento da bateria, foi utilizado um circuito integrado (JY3589) de detecção automática de energia, que exibe o status de carregamento por meio da modulação de diodo fotoemissor (LED).

No gráfico (Figura 48) pode-se ver o comportamento em percentual/horas nas duas fases de carregamento para este tipo de bateria.

Figura 48 – Fases de carregamento da bateria

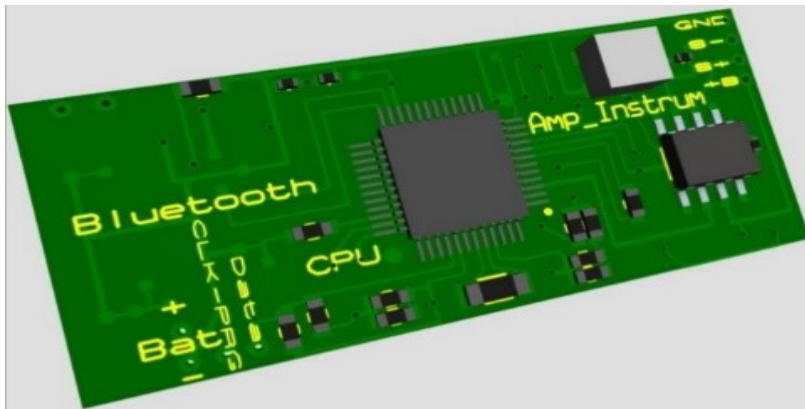


Fonte: Adaptado de Hamann (2011)

Etapa G

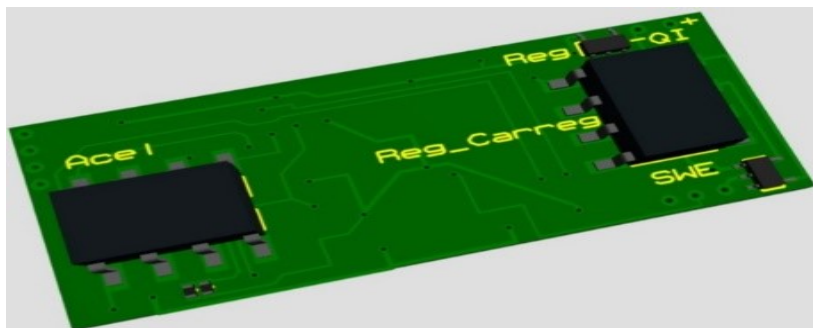
Na Figura 49 e 50 apresenta-se a placa de circuito impresso de dupla face, em fibra de vidro, com componentes em ambos os lados.

Figura 49 – Lado A



Fonte: Autor

Figura 50 – Lado B



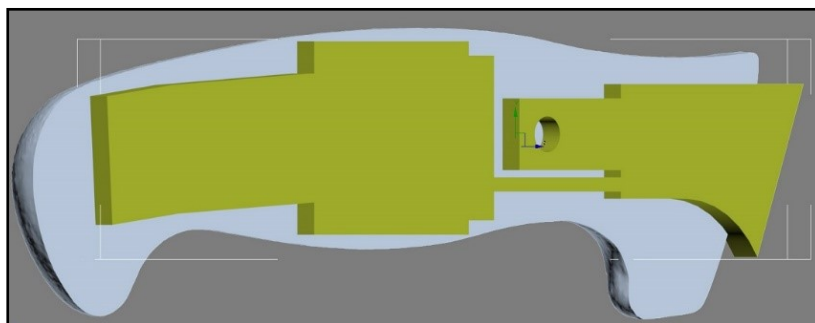
Fonte: Autor

Etapa H

Apresenta-se o formato interno do cabo (Figura 51) considerando as reentrâncias necessárias para fixação: da célula de carga, da PCI de instrumentação, da bateria de alimentação e do modo de carregamento da bateria. Considerou-se também as espessuras mínimas das paredes, de modo a atender à força máxima de pega referenciada no capítulo 2.10. O cumprimento deste requisito pode ser simulado pelo programa *Solidworks Simulation* para o material ABS.

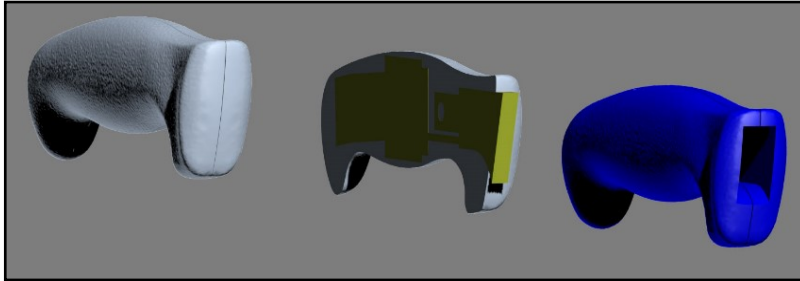
Para permitir a inserção do sólido no interior do cabo (Figura 52), a nuvem de pontos adquirida no escaneamento foi manipulada pelos programas computacionais *3DMaxStudio* e *SolidWorks*.

Figura 51 – Em destaque, o sólido inserido no interior do cabo



Fonte: Autor

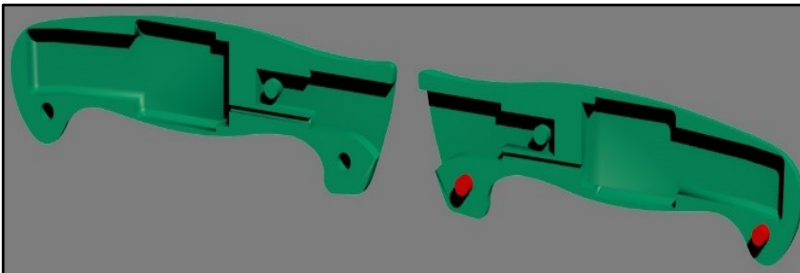
Figura 52 – Digitalização, inserção do sólido no interior do cabo e modelo acabado, respectivamente



Fonte: Autor

Na Figura 53 apresenta-se o cabo virtual pronto para ser fabricado no material selecionado.

Figura 53 – Cabo virtual finalizado



Fonte: Autor

Etapa I

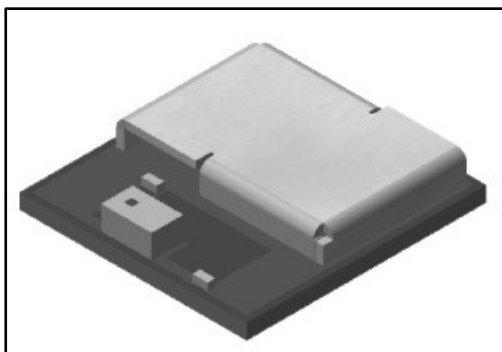
O firmware foi desenvolvido para: implementar o conversor A/D de 12 bits; configurar taxa de amostragem do sistema em 125 ms, por meio de filtro de média móvel; aplicar modos de operação em baixo consumo de energia (LPMS); comunicar com porta SPI para interagir com o módulo de posicionamento espacial (acelerômetro); implementar comunicação UART para ativar módulo *Bluetooth*. No Apêndice encontra-se o fluxograma das etapas de funcionamento do firmware.

Etapa J

No início da busca por um módulo de comunicação sem fio optou-se por utilizar um sistema da *Texas Instruments*, que fornecia gratuitamente um protocolo de comunicação, o *SimpliciTI*.

No entanto, durante os desenvolvimentos observou-se a limitação na comunicação com dispositivos que não possuíam entradas USB, pois este enlace necessita de um transceptor específico, que deve estar conectado ao equipamento que receberá os dados da faca. O Bluetooth já estava sendo cogitado anteriormente, porém uma das preocupações era o consumo excessivo. Com a popularização dos modelos *BLE*, *Bluetooth Low Energy*, que consomem na faixa dos 15 mW para a classe 2 de transmissão (10 metros) de RF, permitiu a incorporação desta tecnologia na instrumentação. O modelo utilizado é fabricado pela *Dialog*, Figura 54, customizado e comercializado pela Panasonic, sob o código PAN1740. Para funcionamento necessita-se de *profile* específico, que o fabricante disponibiliza gratuitamente em seu sítio na internet, para vários tipos de aplicações.

Figura 54 – Módulo *Bluetooth Panasonic* com dimensões de 9,0 mm x 9,5 mm x 1,8 mm

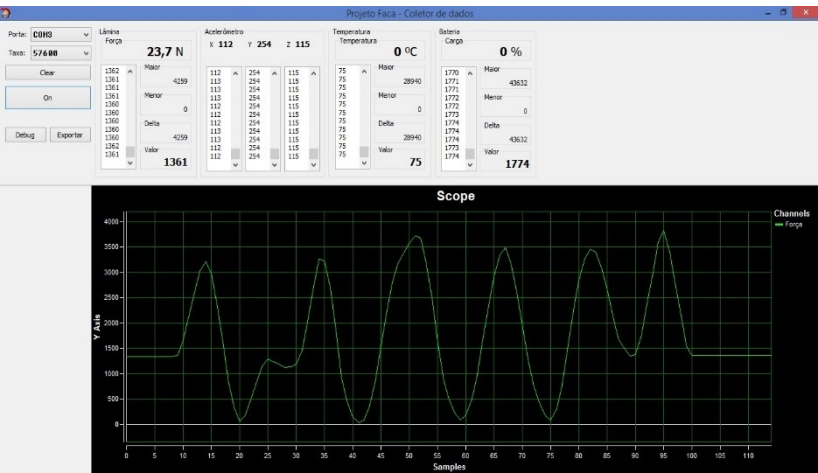


Fonte: Adaptado de Panasonic (2014)

Etapa K

Interface para aquisição de dados desenvolvida em C++ e implementação da entrada de dados via porta serial. Os dados amostrados (Figura 55) estavam em fase de ajustes.

Figura 55 – Dados gráficos e numéricos de força, posição espacial, temperatura e bateria



Fonte: Autor

4.7 Fabricação, montagem e teste do protótipo

4.7.1 Cabo

Para a fabricação do cabo foi utilizado o processo de impressão 3D (Figura 56) com filamento de plástico ABS de 1,75 mm e resolução final de impressão com camadas de 0,6 mm. Na tentativa de reproduzir com maior fidelidade as rugosidades externas do cabo, optou-se em fabricar uma segunda peça em outro tipo de processo, a sinterização a laser (SLS) e o material selecionado foi a Poliamida – PA2200, conforme Figura 57.

Figura 56 – Cabo em ABS



Fonte: Autor

Figura 57 – Cabo em Poliamida

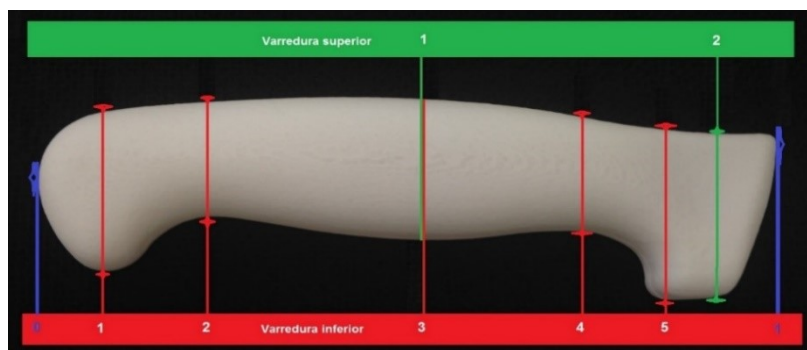


Fonte: Autor

Para conferir as dimensões dos novos cabos utilizou-se um paquímetro, em aço inox da marca *Starret®*, modelo 125 B. Conforme as Figuras 58 e 59 pode-se observar as localizações das doze medidas coletadas em cada parte do cabo, nas três peças (Original, ABS e Poliamida).

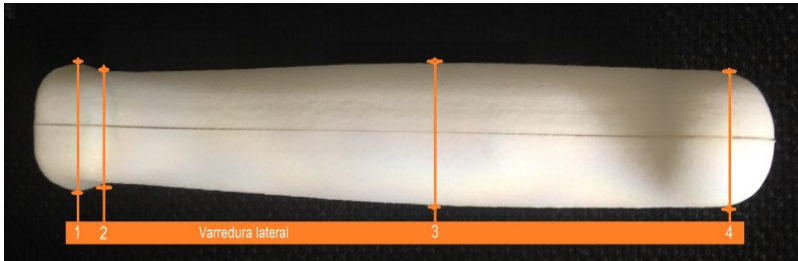
As nomenclaturas aqui utilizadas foram extraídas da ABNT NBR 10126:1998, que define a representação gráfica de cortes no desenho técnico. Cabe salientar que os pontos selecionados são os locais de máximos e mínimos nos cortes longitudinal vertical (linhas verde e vermelha) e longitudinal horizontal (linha laranja). Neste último, em função de o objeto ser simétrico no eixo longitudinal, basta apenas uma varredura. Os dados coletados são apresentados na Tabela 1.

Figura 58– Vista lateral do cabo



Fonte: Autor

Figura 59 – Vista Inferior do cabo



Fonte: Autor

Tabela 1 – Medidas dos cabos em milímetros

Posições no cabo	Original PP	Protótipo ABS	Protótipo Poliamida
1 superior	31,0	31,0	30,5
2 superior	36,0	36,0	36,0
1 inferior	32,5	33,0	33,0
2 inferior	24,2	24,5	24,0
3 inferior	31,0	31,0	30,5
4 inferior	24,4	25,0	24,5
5 inferior	36,8	37,0	36,6
1 longitudinal	140,4	140,5	140,4
1 lateral	20,0	19,5	20,0
2 lateral	17,0	16,0	17,0
3 lateral	22,0	21,6	22,0
4 lateral	18,6	18,0	18,0

Fonte: Dados da pesquisa

4.7.2 Ensaios e testes com a célula de carga

Para levantamento dos dados de sensibilidade, linearidade e repetibilidade, segundo Kronka (2000) e Fagundes (2015), o número de repetições de um experimento depende do número de tratamentos a serem utilizados e do delineamento experimental escolhido. De um modo geral,

recomenda-se que o número de parcelas do experimento não seja inferior a vinte repetições.

Para calibração e testes da instrumentação far-se-á uso do Sistema de Calibração e Teste – SCT (Figura 60).

Desenvolvido em 2014 pelo autor desta dissertação para trabalhos na área da extensometria, o SCT utiliza dois circuitos eletrônicos (Figura 61) com um transdutor do tipo célula de carga padrão (Figura 62), com incremento manual de força, executado por mola helicoidal, e saída de dados via software gráfico ou painel digital. O equipamento permite conhecer a linearidade da célula de carga em desenvolvimento, como também, especificar sua sensibilidade.

Por ter dois *hardwares* e dois *firmwares* idênticos, o Sistema de Calibração e Teste permite associar valores diretamente. Possui resolução de 1 g, com valor máximo de 5000 g de carregamento e zeramento manual da força inicial aplicada (zero máquina).

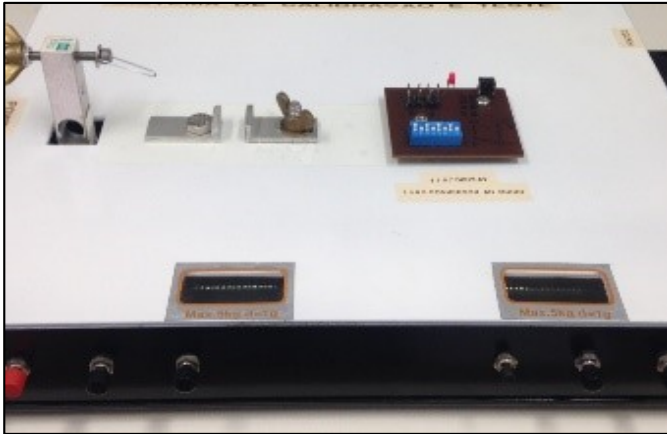
Para testes dinâmicos, o SCT possui internamente um condicionador eletrônico para amplificação dos sinais do protótipo “célula de carga” e um conversor A/D de 12 bits (4096 valores). Após o processamento, o sistema trabalha com 8 amostras por segundo (125 ms), que são enviadas via porta serial para comunicação com o microcomputador.

Figura 60 – Sistema de Calibração e Teste – SCT



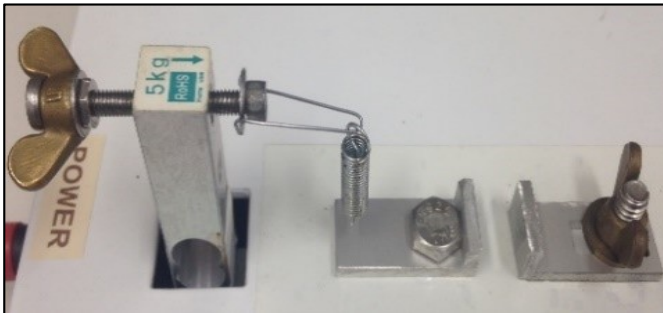
Fonte: Autor

Figura 61 – Vista em perspectiva do SCT



Fonte: Autor

Figura 62 – Habitat de teste do SCT



Fonte: Autor

Na Figura 63 pode-se visualizar a célula de carga sendo tensionada no Sistema de Calibração e Teste. A força de tração aplicada pela mola, ancorada na célula de carga padrão, viabiliza maior amplitude no movimento, possibilitando aplicação da carga desejada com maior exatidão.

Figura 63 – Aquisição de dados da célula de carga



Fonte: Autor

A Tabela 2 apresenta todos os dados coletados para o transdutor. Para resolução do sistema foram utilizados intervalos de 10 g, o que gera um faixa de trabalho de 300 pontos (0 kg a 3 kg).

Após alguns pré-testes e análise comportamental do transdutor pode-se perceber que, única e exclusivamente para a coleta de dados, a análise da sensibilidade, linearidade e repetibilidade não necessitaria utilizar, em toda faixa de trabalho, resolução com intervalos de 10 gramas.

Com isto, para definir um possível *offset* necessário para correção da linearidade e sensibilidade, adotou-se o seguinte critério:

- (0 a 100) gramas com resolução de 10 g.
- (100 a 1000) gramas com resolução de 100 g.
- (1000 a 3000) gramas com resolução de 500 g.

A seguir, a Tabela 2 com os dados.

Tabela 2 – Coletas da célula de carga

Coletas	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
MASSA EM GRAMAS																				
10	6	6	5	6	5	5	6	5	5	6	6	6	5	5	5	6	5	6	6	6
20	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13
30	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19
40	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24
50	30	31	31	31	31	31	31	31	30	31	30	30	31	31	31	31	31	31	31	31
60	38	38	38	38	37	37	38	38	38	38	38	38	38	38	38	38	38	38	38	38
70	43	44	43	43	44	44	44	43	43	44	44	44	43	44	44	44	43	43	43	44
80	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51
90	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55
100	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63
200	126	126	126	126	126	126	126	126	126	126	126	126	126	126	126	126	126	126	126	126
300	189	189	190	189	189	189	189	189	189	189	189	189	189	189	189	189	189	189	189	189
400	251	252	250	250	252	251	251	251	252	252	252	251	250	250	250	251	251	251	252	250
500	315	314	315	315	314	315	316	315	315	315	316	315	315	315	315	316	315	314	315	315
600	379	379	379	379	379	380	379	379	378	379	379	379	378	379	379	379	380	379	379	379
700	440	439	440	440	440	440	440	440	440	440	440	439	440	440	440	440	440	440	440	440
800	503	502	503	503	503	503	503	503	503	503	503	503	503	503	503	503	502	503	503	503
900	566	566	565	565	565	565	565	565	565	565	565	565	565	565	565	565	565	565	565	565
1000	629	629	627	627	629	629	629	629	629	627	629	629	629	629	627	629	629	629	629	629
1500	937	938	937	937	937	937	937	937	937	935	937	937	937	937	937	937	937	937	937	937
2000	1251	1251	1251	1252	1252	1251	1251	1251	1251	1254	1251	1251	1251	1251	1251	1251	1252	1251	1251	1251
2500	1566	1565	1565	1565	1564	1565	1565	1565	1564	1565	1565	1565	1565	1564	1565	1565	1565	1565	1565	1565
3000	1877	1875	1877	1877	1877	1877	1877	1877	1877	1877	1876	1874	1877	1877	1877	1877	1876	1877	1877	1877

Fonte: Dados da pesquisa

Embora as células de carga padrão e protótipo tenham estruturas diferenciadas, no que diz respeito ao valor da resistência da ponte completa de *Wheatstone*, a associação direta em gramas do valor referência com o valor colhido é válida, em virtude da aplicação, no momento da coleta de dados, do zero máquina que o SCT possui.

Cabe ainda esclarecer que as medições propostas estão circunscritas sobre o comportamento do transdutor e da força aplicada sob o local de ancoragem da espiga da lâmina.

Vale lembrar que, por utilizarmos uma alavanca interpotente a força aplicada sob a lâmina será sempre menor que o valor percebido no local de ancoragem, visto que, a alavanca interpotente possui vantagem mecânica inferior a 1 (braço de força / braço de resistência).

4.7.3 Simulação de leiaute da PCI

Para o posicionamento funcional e estratégico dos componentes na placa de circuito impresso (PCI), deve-se considerar antecipadamente a inserção dos cabos: na célula de carga, na bateria e no carregador de bateria.

Considerar também o posicionamento do acelerômetro e do *Bluetooth* em relação a mão, o primeiro para definir a distância dele com o fulcro da alavanca (punho) e o segundo no que tange a área livre de obstáculos (mão) para propagação do sinal. Como resultado tem-se o leiaute da PCI (Figura 64).

Figura 64 – Simulação no posicionamento de componentes

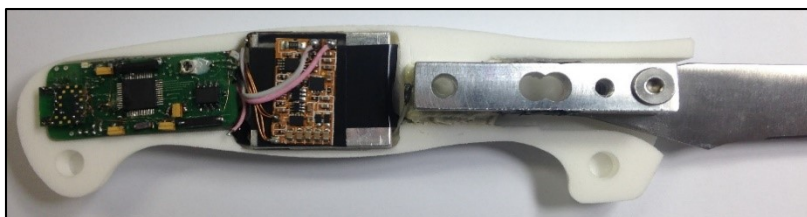


Fonte: Autor

4.7.4 Fase inicial da montagem do protótipo

Na fase inicial de acomodações e testes no interior do cabo da faca (Figura 65), considera-se o funcionamento por etapas: programação e teste do microcontrolador e do módulo *Bluetooth*. Testes: do carregador de bateria por indução; da chave magnética de liga/desliga; do conversor A/D da extensometria, da bateria e da temperatura; e da comunicação SPI com o acelerômetro. A Figura 66 apresenta a faca no seu estado finalizado.

Figura 65 – Montagem componentes



Fonte: Autor

Figura 66 – Protótipo finalizado



Fonte: Autor

4.7.5 A massa entre a ferramenta original e a instrumentalizada

Para a montagem do protótipo foi utilizado o cabo fabricado em poliamida, em virtude do acabamento entre as laterais possibilitarem encaixe com maior exatidão, o que viabilizou melhor estanqueidade. Na Tabela 3 pode-se observar que não houve diferença de massa entre as ferramentas.

Tabela 3 – Massa das facas

Original	Instrumentalizada em poliamida
91 gramas	91 gramas

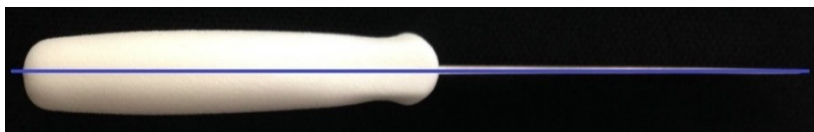
Fonte: Dados da pesquisa

4.7.6 Centro de gravidade entre a ferramenta original e a instrumentalizada

O centro de gravidade de um corpo é o ponto onde pode ser considerada a aplicação da força da gravidade. Se as dimensões do corpo forem pequenas, em comparação ao tamanho da Terra, é possível demonstrar que o centro de gravidade praticamente coincide com o centro de massa (SILVA, 2016), que pode ser explicado pelo comportamento da concentração de toda a massa de um objeto em um único ponto (ZILIO; BAGNATO, 2002).

Para obter, através de experimento, o centro de gravidade de um corpo que possui forma simétrica de espessura em um dos eixos (Figura 67), pode-se proceder inicialmente suspendendo-o por um ponto qualquer, após atingir a posição de equilíbrio acha-se a reta vertical r (Figura 68) e um dos pontos que definirá o centro de gravidade (Figura 69).

Figura 67 – Vista superior da ferramenta original e sua simetria



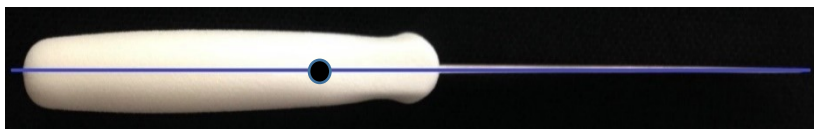
Fonte: Autor

Figura 68 – Vista lateral, reta r



Fonte: Autor

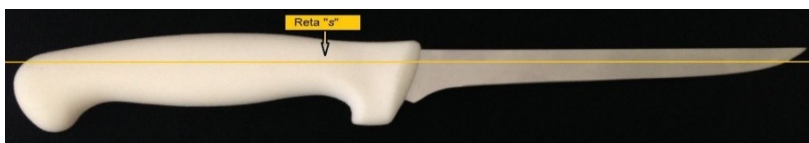
Figura 69 – Centro de gravidade aproximado na vista superior



Fonte: Autor

Em seguida, suspende-se o corpo por outro ponto e novamente após atingir a posição de equilíbrio, acha-se a reta vertical s (Figura 70). O centro de gravidade estará no cruzamento das retas r e s (Figura 71).

Figura 70 – Vista lateral, reta s



Fonte: Autor

Figura 71 – Centro de gravidade aproximado na vista lateral



Fonte: Autor

A diferença encontrada no centro de gravidade entre a faca original e a instrumentalizada encontra-se na Tabela 4.

Tabela 4 – Diferença no centro de gravidade

Original	Instrumentalizada
Distante 106 mm do fim do cabo	Distante 98 mm do fim do cabo
Distante 11 mm da parte superior do cabo	Distante 9 mm da parte superior do cabo

Fonte: Dados da pesquisa

4.7.7 Impacto da estanqueidade do cabo/haste na sensibilidade e linearidade

Para teste do impacto da aplicação do selante à base de borracha de silicone com fungicida e cura neutra na sensibilidade e linearidade da faca instrumentalizada, comparou-se valores antes e após a aplicação dessa resina. Para o teste, submeteu-se um ponto comum e específico da lâmina sob a força intercalada de três corpos com massas distintas.

Com isto, pode-se achar o percentual de interferência na mensuração. Foram testados os valores 100 g, 200 g e 300 g. A diferença entre a faca sem estanqueidade e com estanqueidade orbitou em 8%.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Cerne do desenvolvimento

Para atingir o objetivo geral deste trabalho na instrumentalização mantendo as características físicas da faca original, necessitou-se perseguir dois pontos fundamentais: não explicitar a ação da coleta de dados e manter a estanqueidade da ferramenta. Para isso, utilizou-se da transmissão de dados sem fio e do carregamento de bateria por indução (sem fio), respectivamente.

Na transmissão de dados sem fio, a utilização da tecnologia *Bluetooth* permitiu robustez no enlace e inúmeras possibilidades de expansão, caso no futuro opte-se por aplicações em larga escala nos frigoríficos e abatedouros.

O carregamento de bateria por indução possibilita o manuseio da ferramenta com segurança e facilidade, seja durante a etapa de uso, por manter íntegro o interior da instrumentação, ou durante a etapa de carregamento, por apenas depositá-la em um aparador.

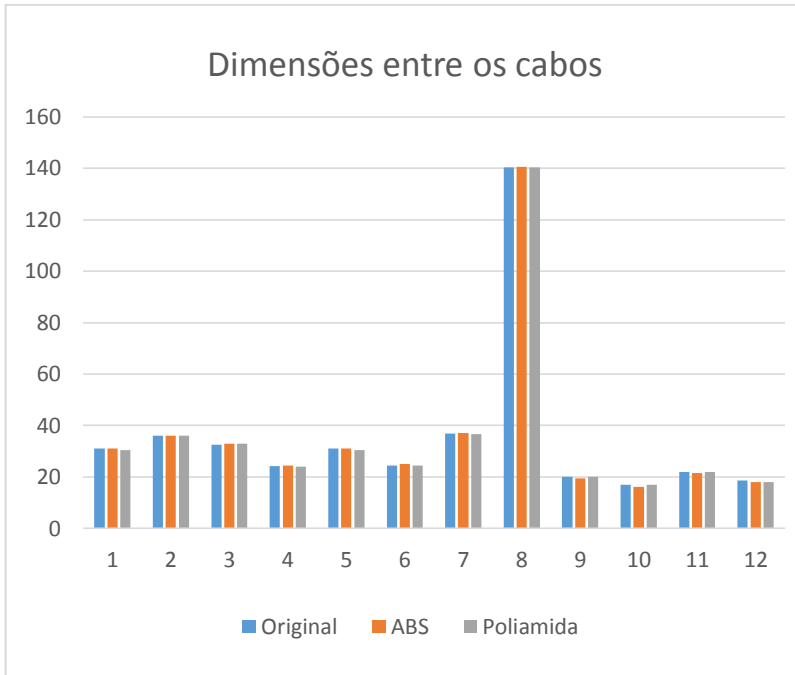
5.2 Protótipo do cabo

Na análise dos objetivos específicos, o ponto que norteou o desenvolvimento e se apresentou como restrição foi o cabo da faca e sua estrutura física (massa, dimensão e centro de gravidade).

Análise do cabo – após obter as medidas entre o modelo original e os protótipos (Figura 72) pode-se observar que os valores apresentados não divergiram significativamente, o que já se esperava em função da digitalização ocorrer com alto grau de exatidão. O maior valor discrepante foi na posição dois da varredura lateral do cabo fabricado em ABS.

No que se refere às rugosidades do cabo, percebe-se aparentemente que os dois materiais utilizados não reproduziram com fidelidade os detalhes capturados pela digitalização. Muito provavelmente pelos métodos de fabricação (impressão 3D em ABS e sinterização laser (SLS) em Poliamida – PA2200) não terem sido o mesmo utilizado pelo fabricante do cabo original (injeção plástica em Polipropileno - PP), neste último, o custo e o engessamento do tipo de ferramental são fatores que inviabilizam a construção de protótipos.

Figura 72 – Dimensões dos cabos e as posições medidas



Fonte: Dados da pesquisa

Identificou-se que as diferenças entre os cabos são da ordem de décimos de milímetros. Como o coeficiente de variação (CV) analisa a dispersão em termos relativos, ele foi dado em percentual. Quanto menor for o valor do coeficiente de variação, mais homogêneos serão os dados, ou seja, menor será a dispersão em torno da média.

De uma forma geral, se o CV for menor ou igual a 15% temos baixa dispersão e dados homogêneos. É o que se evidencia na Tabela 5. Cabe salientar que os dados confrontados na análise pertencem ao cabo original e ao cabo de poliamida.

Tabela 5 – Percentual de discrepância entre os cabos

Posição no cabo	Desvio Padrão	Coefficiente de Variação CV (%)
1 superior	0,35	1,15
2 superior	0,00	0,00
1 inferior	0,35	1,08
2 inferior	0,14	0,59
3 inferior	0,35	1,15
4 inferior	0,07	0,29
5 inferior	0,14	0,39
1 longitudinal	0,00	0,00
1 lateral	0,00	0,00
2 lateral	0,00	0,00
3 lateral	0,00	0,00
4 lateral	0,42	2,32

Fonte: Dados da pesquisa

Apesar de não ter concluído a montagem final do cabo em ABS, o valor obtido da massa na junção de todas as peças foi inferior ao da ferramenta original. Com cabo em poliamida, o valor permaneceu o mesmo da faca original.

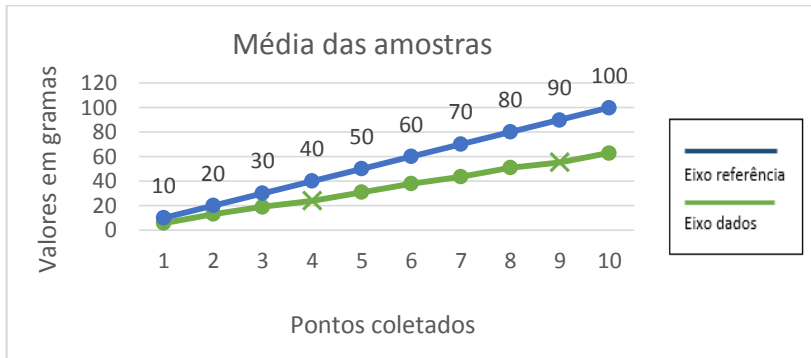
Para o centro de gravidade a diferença foi de poucos milímetros, o que na prática pode ser considerado imperceptível, em virtude da forma como cada trabalhador manuseia o cabo, com maior ou menor liberdade no interior da mão.

5.3 Desempenho do transdutor

Na aquisição de dados, o transdutor selecionado para tarefa repercute no final do projeto em fidelidade e confiabilidade do sinal admitido. Tanto a sensibilidade relativa, que pode ser descrita como inclinação da reta em relação à reta referência, como a linearidade, que é homogeneidade na sucessão dos ângulos dos vetores adquiridos, podem ser impactadas, no caso da extensometria, pelo formato do elemento mola selecionado para a estrutura metálica física. A escolha da viga em balanço/biengastada deu-se no sentido de minimizar efeitos posteriores indesejáveis, permitindo equilíbrio térmico no transdutor, eliminando forças axiais paralelas e momentos torçores.

No gráfico da Figura 73 pode-se observar o comportamento dos dados adquiridos pela célula de carga protótipo (linha verde), em relação à célula de carga padrão de calibração (linha azul). A sensibilidade relativa com a célula padrão está expressa pela diferença entre os ângulos das duas retas. Nota-se que nos pontos de coleta 4 e 9, que correspondem respectivamente a (40 e 90) gramas, há a diminuição da sensibilidade em virtude do afastamento da reta referência.

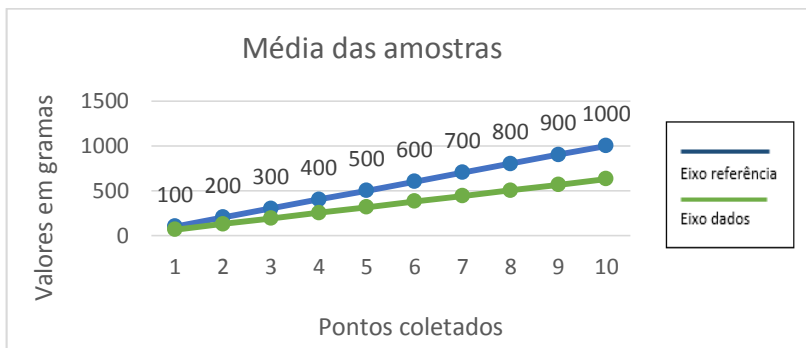
Figura 73 – Gráfico comportamental relativo à resolução de 10 gramas



Fonte: Dados da pesquisa

Na Figura 74, embora os pontos adquiridos assumiram a resolução de 100 gramas a partir dos cem gramas, observa-se comportamento similar ao gráfico anterior.

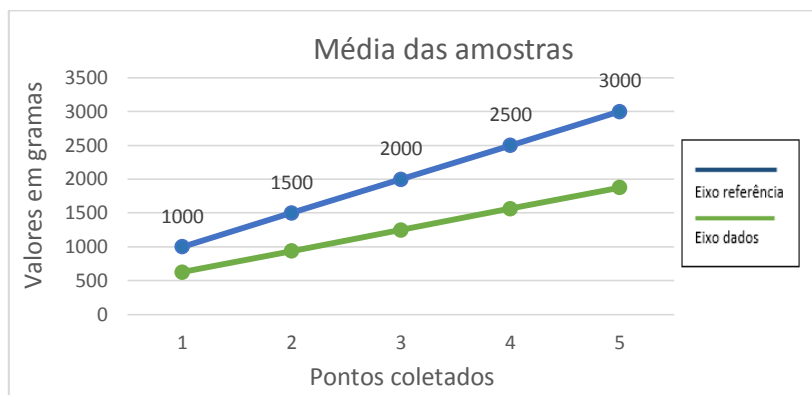
Figura 74 – Gráfico comportamental relativo à resolução de 100 gramas



Fonte: Dados da pesquisa

Cabe registrar que após cada sequência incremental de força aplicada sobre as células padrão e protótipo não houve registro da presença de histerese. Comprovou-se este comportamento ao observar que os valores apresentados nos painéis digitais (SCT) no início do teste, eram os mesmos no final dele ou seja, o valor zero retornava imediatamente para as duas células. Na Figura 75 apresenta-se o gráfico com a parte final da escala de medição.

Figura 75 – Gráfico comportamental relativo à resolução de 500 gramas



Fonte: Dados da pesquisa

Uma forma de corrigir a discrepância entre os pontos de coleta é a linearização da taxa de crescimento entre cada novo valor adquirido e a utilização deste, como base para criação de um *offset* no conversor A/D da PCI.

Para linearização, subtrai-se as médias das amostras adjacentes e aplica-se a média sobre a soma de todas as diferenças. Exemplos em destaque na tabela: $(0,00 - 5,55 = 5,55)$, ..., $(55,00 - 63,00 = 8,00)$.

Este procedimento facilita a implementação, pois permite a utilização de um ou mais valores para correção de toda faixa de aquisição de dados. Na Tabela 6 pode-se visualizar os valores que resultam desta ação.

Tabela 6 – Valores e médias das amostras até 100 gramas

Valor padrão referência em gramas	Valor total das amostras	Média das amostras	Valor relativo entre cada média das amostras adjacentes	Aplicação da média dos valores relativos
		0,00		
10	111	5,55	5,55	6,3
20	260	13,00	7,45	12,6
30	380	19,00	6,00	18,9
40	480	24,00	5,00	25,2
50	616	30,80	6,80	31,5
60	758	37,90	7,10	37,8
70	871	43,55	5,65	44,1
80	1020	51,00	7,45	50,4
90	1100	55,00	4,00	56,7
100	1260	63,00	8,00	63,0
Média dos valores relativos			6,30	

Fonte: Dados da pesquisa

Na Tabela 7 visualiza-se que, a média dos valores relativos acima de 100 gramas é proporcionalmente similar ($62,86/10 = 6,28$) com a média dos valores relativos abaixo de 100 gramas (Tabela 6).

O que implica em poder utilizar um único valor para toda faixa de linearização.

Cabe ainda registrar que os valores de (1000 a 3000) gramas, embora não tenham sido explicitados em uma tabela de linearização, possuem o mesmo comportamento, conforme Figura 75.

Tabela 7 – Valores e médias das amostras de 100 a 1000 gramas

Valor padrão referência em gramas	Média das amostras	Valor relativo entre cada média das amostras adjacentes
100	63,0	63,0
200	126,0	63,0
300	189,1	63,1
400	251,0	61,9
500	315,0	64,0
600	379,0	64,0
700	439,9	60,9
800	502,9	63,0
900	565,1	62,2
1000	628,6	63,5
Média dos valores relativos		62,86

Fonte: Dados da pesquisa

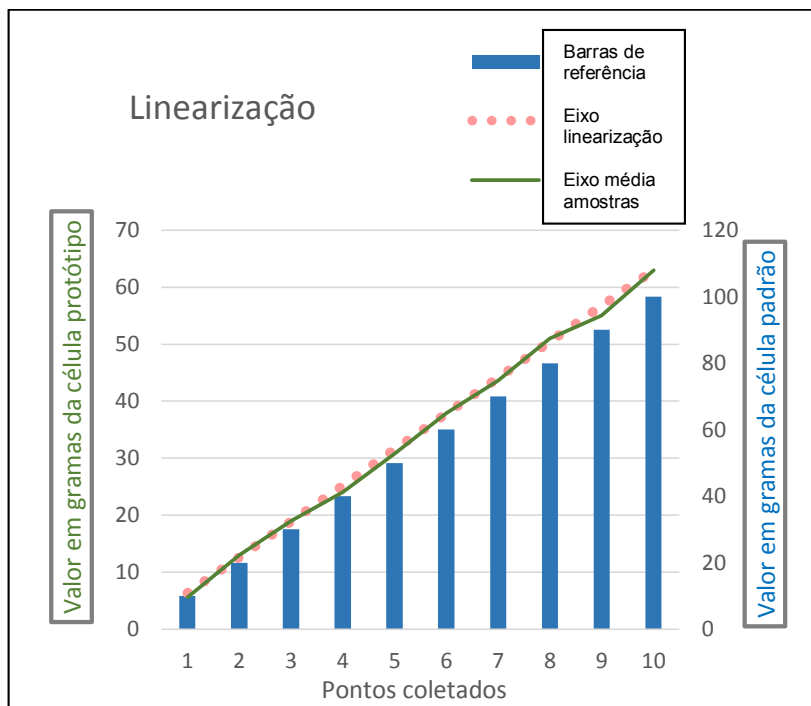
Conforme a Figura 76 pode-se visualizar, a título de exemplo, o efeito da aplicação do método de linearização (ponto rosa) sobre os valores coletados (linha verde).

Neste caso, como o valor é deficitário, pois a cada 10 gramas temos registro de apenas 6,3 gramas, nosso *offset* do conversor A/D deve providenciar um acréscimo de 3,7 gramas para cada novo valor entrante.

É importante registrar que todos os valores adquiridos são menores que a resolução do sistema, o que repercute no atendimento mínimo dos intervalos propostos.

Uma outra possibilidade de implementação, sem o uso dessa taxa de linearização, seria a utilização de um vetor (*array*) com 300 posições, onde a tabela da média das amostras é implementada diretamente no firmware.

Figura 76 – Gráfico de linearização das amostras de 0 a 100 gramas



Fonte: Dados da pesquisa

Em um ensaio pontual utilizando o coeficiente de variação (CV), que analisa a dispersão em termos relativos, apresenta-se na Tabela 8 a repetibilidade do transdutor.

Quando se calcula o valor para toda a faixa de trabalho (valor médio) pode-se observar, ainda na Tabela 8, o pequeno coeficiente encontrado.

Tabela 8 – Repetibilidade do transdutor

Massa Referência (gramas)	Desvio Padrão	Coefficiente de Variação CV (%)
10	0,71	12,856
20	0,00	0,000
30	0,00	0,000
40	0,00	0,000
50	0,71	2,318
60	0,71	1,886
70	0,71	1,626
80	0,00	0,000
90	0,00	0,000
100	0,00	0,000
200	0,00	0,000
300	0,71	0,373
400	1,41	0,563
500	1,41	0,449
600	0,71	0,187
700	0,71	0,161
800	0,71	0,141
900	0,71	0,125
1000	1,41	0,225
1500	0,71	0,075
2000	0,71	0,057
2500	1,41	0,090
3000	2,12	0,113
Valor médio do CV		0,924%

Fonte: Dados da pesquisa

5.4 Informações do protótipo faca

Neste trabalho optou-se em utilizar a taxa de linearização encontrada nos testes, sendo viabilizada pelo acréscimo do valor de 3,7 gramas a cada 6,3 gramas de força medida e a utilização de toda a faixa de medição (10 a 3000 gramas).

Durante avaliação da instrumentação, a eletrônica apresentou consumo aproximado de 45 mW, que permite autonomia de funcionamento em torno de 72 horas. Esse consumo reduzido originou-se: do tipo de extensômetro (1.000 Ohms) e da topologia das interligações

(ponte completa e ligações em série); do microcontrolador, pelo consumo na ordem de μW e do *Bluetooth*, pelo modelo “*Low Energy – LE*”.

Já prevendo impacto da estanqueidade do cabo na sensibilidade e linearidade da ferramenta, optou-se durante desenvolvimento do cabo em ampliar a abertura de entrada da espiga da lâmina, conforme pode ser visto na Figura 52 (modelo acabado) do capítulo 4.6, possibilitando a camada de borracha de silicone sofrer menos esforço da camada limítrofe das bordas internas do cabo. Pode-se observar que apenas 8% de sensibilidade foi reduzida sem impactar na linearidade. Este percentual foi corrigido no ganho do amplificador de instrumentação no circuito do condicionador eletrônico.

A aquisição dos dados de movimento nos três eixos (x, y, z) ocorre pela interface apresentada na Figura 55, por meio do botão exportar (lateral esquerda), que gera uma tabela com dados no formato numérico. Pode-se utilizar esses dados para levantar informações com relação ao deslocamento ocorrido (amplitude), a quantidade dos movimentos (frequência), velocidade e aceleração.

6 CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES

Concluiu-se que, o objetivo maior de não descaracterizar o instrumento original, no que tange ao formato da ferramenta, foi atingido. No que se refere às rugosidades do cabo, percebe-se que os dois materiais utilizados não reproduziram com fidelidade os detalhes capturados pela digitalização. Muito provavelmente pelos métodos de fabricação não terem sido o mesmo utilizado pelo fabricante do cabo original.

Com relação a transmissão de dados sem fio, além de obter sucesso no enlace de comunicação, pode-se utilizar uma tecnologia não proprietária, viabilizando a interoperabilidade com outros tipos de dispositivos que não dispõem de portas USB (*Tablets, Smartphones*, entre outros), não necessitando o uso de receptores específicos.

No que diz respeito a massa e ao centro de gravidade, a busca em extrair todo e qualquer material do interior do cabo da faca permitiu posteriormente posicionar estrategicamente os componentes, permanecendo as mesmas especificações da ferramenta original.

Com relação a linearidade, sensibilidade e repetibilidade dos dados, observou-se que o comportamento do transdutor é predominantemente linear, com sensibilidade e repetibilidade aceitáveis para a aplicação que se predispõe.

No decorrer do desenvolvimento deste trabalho, novos e melhores sensores surgiram na área da acelerometria, neste sentido, algum tipo de aperfeiçoamento pode ser implementado, no que tange a troca do acelerômetro atual por um módulo de 9 eixos, que combina, acelerômetro, giroscópio e magnetômetro.

No intuito de aperfeiçoar este projeto, registra-se a possibilidade de desenvolver um software para as plataformas *Android* e *iOS*, que possibilite aquisição de dados da ferramenta com instrumentação nos dispositivos móveis do tipo *tablet* e *Smartphones*.

Registra-se também a possibilidade do desenvolvimento de sistema especialista (programa computacional) que possa associar dados adquiridos pela ferramenta instrumentalizada, com a estrutura anatômica e fisiológica do punho e da mão e com isto, comparar com lesões associadas ao uso de ferramentas manuais e lesões comuns associadas ao uso excessivo.

REFERÊNCIAS

ACAR, C. e SHKEL, A.M. Experimental evaluation and comparative analysis of commercial variable-capacitance MEMS accelerometers. **Journal of Micromechanics and Microengineering**. Institute of Physics Pub., v.13, pp. 634-645, 2003.

ARAGÃO, I. **Princípios da Ciência e Tecnologia dos Materiais - Propriedades Mecânicas dos Materiais**. Estácio – Ensino Superior. 2015. Disponível em: <<http://slideplayer.com.br/slide/6646386/#>>. Acesso em: 27 julho 2015.

ALCOA CIA ALUMINIOS. **Ligas e Têmperas de Extrusão**. ALCOA, 2010. Disponível em: <http://www.alcoa.com/brasil/pt/resources/pdf/industria/catalogo_ligas_temperas_2010.pdf>. Acesso em: 3 dezembro 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT PB-50**: furos de passagem para parafusos e peças roscadas similares-dimensões. Rio de Janeiro – RJ, 1990.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 6016**: 2010 métodos de medição das massas de máquinas completas, seus equipamentos e componentes. Rio de Janeiro – RJ, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14280**: (ABNT, 2001) cadastro de acidente do trabalho - Procedimento e classificação. Rio de Janeiro – RJ, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NR36**: (ABNT, 2013) Segurança e Saúde no Trabalho em Empresas de Abate e Processamento de Carnes e Derivados. Rio de Janeiro – RJ, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 10126**:1998. Confirmada em 07 de agosto de 2013. Rio de Janeiro – RJ, 2013.

ARVIDSSON, I., BALOGH, I., HANSSON, G. A., OHLSSON, K., ÅKESSON, I. e NORDANDER, C. Rationalization in meat cutting e consequences on physical workload. **Applied Ergonomics**, 43: 1026–1032, 2012.

BEEBY, S., ENSELL, G., KRAFT, M. e WHITE, N. **MEMS mechanical sensors**. Artech House, Inc, 2004.

BEER, F. P., JOHNSTON Jr, E. R. **Resistência dos Materiais**. 3ª ed. Pearson Makron Books. São Paulo – SP, 1999.

BISSELL, C. C. e CHAPMAN, D. A. “Digital signal transmission”. **Cambridge University Press**. p. 64. 1992.

BRAGA, A. R. e BRAGA, C. M. P. **Instrumentação Eletrônica**. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. Belo Horizonte – MG, 2002. Disponível em: <http://docslide.com.br/documents/apostila-instrumentacao-eletronica-cefet-mg.html>>. Acesso em: 23 setembro 2014.

BRUSAMARELLO, V. **Células de Carga**. UFRGS. 2009.

Disponível em:

<<https://chasqueweb.ufrgs.br/~valner.brusamarello/eleinst/ufrgs7.pdf>>. acesso em: 1 janeiro de 2014.

BUCKLE, P.W. Work factors and upper limb disorders. **British Medical Journal** 315, 1997.

CASTRO, S. V. **Anatomia Fundamental**. 3ª ed. McGraw-Hill do Brasil. São Paulo – SP, 1985.

CAUDURO, C. R. **Uma metodologia para auxílio ao projeto mecânico de transdutores extensométricos**. Tese de Doutorado, PPGEM/UFRGS, 1992.

CHAFFIN, D. B., ANDERSSON, G. B. J., MARTIN, B. J. **Occupational Biomechanics**. 4ª ed. Wiley-interscience, 2006.

CLAUDON, L., MARSOT, J. Effect of knife sharpness on upper limb biomechanical stresses - a laboratory study. **International Journal of Industrial Ergonomics** 36, 2006.

CLAUDON, L. Influence on grip of knife handle surface characteristics and wearing protective gloves. **Applied Ergonomics**, 37: 729–735, 2006.

CRUZ, J. A. DA P. **Inovação Tecnológica na Área de Metrologia de Força**: Protótipo de Um Sistema de Padronização da Grandeza Através do Método da Pirâmide de Transdutores. Dissertação Tecnológica de Mestrado. CEFET/RJ - 2001. Disponível em:

<http://repositorios.inmetro.gov.br/bitstream/10926/1156/1/Cruz_2001.pdf>. Acesso em: 15 junho 2015.

FAGUNDES, R. S. **Estatística Experimental**. Cascavel – PR, 2015
Disponível em:

<<http://docslide.com.br/documents/estatistica-55b08ab230caf.html>>.

Acesso em: 24 julho 2015.

FARIA, U. C. **Monitoramento Informatizado de Forças Exercidas pelos Membros Superiores e Inferiores de Pacientes**. Dissertação de mestrado. UNESP, Ilha Solteira – SP, 2001.

FERREIRA, A. B. H. **Dicionário Aurélio Eletrônico: Século XXI**. Versão 3.0. Nova Fronteira & Lexikon Informática. 1 CD-ROM. 1999.

FIALHO, A. B. **Instrumentação Industrial**: Conceitos, Aplicações e Análises. Érica. São Paulo – SP, 2002.

FIALHO, A. B. **SolidWorks Premium 2009**: Teoria e prática no desenvolvimento de produtos industriais – Plataforma para projetos CAD/CAE/CAM. Érica. São Paulo – SP, 2009.

GIL, A. C. **Como Elaborar Projetos de Pesquisa**. 4ª ed. Atlas. São Paulo – SP, 2002.

HAMANN, R. **Cargas Completas**: por que os 20% demoram tanto? Tecmundo. 2011. Disponível em:

<<http://www.tecmundo.com.br/bateria/9287-por-que-as-baterias-de-ion-litio-demoram-mais-para-carregar-no-final-.htm>>. Acesso em: 16 março 2014.

HAMILL, J., KNUTZEN, K. M. **Bases Biomecânicas do Movimento Humano**. 2ª ed. Manole. Barueri – SP, 2008.

HOFFMANN, K. **An Introduction to Stress Analysis and Transducer Design using Strain Gauges**. HBM – Test and Measurement, 2012.

HSIANG, S.; MCGORRY, R. & BEZVERKHNY, I. The use of Taguchi's methods for the evaluation of industrial knife design. **Ergonomics**. Vol.40, n.4, p. 476-490. 1997.

IIDA, I. **Ergonomia**: Projeto e Produção. 2ª ed. Edgard Blücher. São Paulo – SP, 2005.

JUUL-KRISTENSEN, B., FALLENTIN, N., HANSSON, G. A., MADELEINE, P., ANDERSEN, J. H. e EKDAHL, C. Physical workload during manual and mechanical deboning of poultry. **International Journal of Industrial Ergonomics**, 29: 107–115, 2002.

KAAJAKARI, V. **Practical MEMS**: analysis and design of microsystems, MEMS sensors, electronics, actuators, rf mems, optical MEMS, and microfluidic systems. Small Gear Publishing, 2009.

KENDALL, F. P., McCREARY, E. K., PROVANCE, P. G., RODGERS, M. M., ROMANI, W. A. **Músculos**: Provas e Funções. 5ª ed. Manole. Barueri – SP, 2007.

KRONKA, S. D. N. **Estatística Experimental**. Piracicaba – SP, 2000. Disponível em:

<<http://docplayer.com.br/10665646-Estatistica-experimental-dr-sergio-do-n-kronka-1-introducao.html>>. Acesso em: 28 setembro 2015.

LIRA, F. A. **Metrologia na Indústria**. Érica. São Paulo – SP, 2001.

LUCA, C. J. **Delsys Surface Electromyography**: Detection and Recording. Delsys Incorporated, 2003. Disponível em: http://www.delsys.com/Attachments_pdf/WP_Sampling1-4.pdf>. Acesso em: 16 outubro 2013.

MALVINO, A. P. **Eletrônica - volume 1**. (Tradução: José Lucimar do Nascimento; revisor técnico: Antonio Pertence Junior). 4a ed. São Paulo - Brasil: Makron Books, 1995.

MARANHÃO A. C. ME. **Facas Artesanais & Cia**. Acutelaria.com. Brasília – DF, 2015. Disponível em: <http://www.acutelaria.com/#!tipos-laminas-e-fios/cn30>>. Acesso em: 18 julho de 2015.

MARSOT, J., CLAUDON, L. e JACQMIN, M. Assessment of knife sharpness by means of a cutting force measuring system. **Applied Ergonomics**, 38: 83–89, 2007.

McCARTHY, C. T., ANNAIDH, A. N. e GILCHRIST, M. D. On the sharpness of straight edge blades in cutting soft solids: Part II – Analysis of blade geometry. **Engineering Fracture Mechanics**, 77: 437–451, 2010.

McCARTHY, C. T., HUSSEY, M. e GILCHRIST, M. D. On the sharpness of straight edge blades in cutting soft solids: Part I – indentation experiments. **Engineering Fracture Mechanics**, 74: 2205–2224, 2007.

McGORRY, R. W. A system for the measurement of grip forces and applied moments during hand tool use. **Applied Ergonomics**, 32: 271–279, 2001.

McGORRY, R.W., DOWD, P.C. e DEMPSEY, P.G. Cutting moments and grip forces in meat cutting operations and the effect of knife sharpness. **Applied Ergonomics**, 34: 375–382, 2003.

McGORRY, R.W., DOWD, P.C. e DEMPSEY, P.G. The effect of blade finish and blade edge angle on forces used in meat cutting operations. **Applied Ergonomics**, 36: 71–77, 2005.

McGORRY, R.W., DOWD, P.C. e DEMPSEY, P.G. A technique for field measurements of knife sharpness. **Applied Ergonomics**, 36: 635–640, 2005.

McGORRY, R., YOUNG, S. L., MURPHY, P. e BROGMUS, G. Experimental appraisal of a manual task evaluator. **International Journal of Industrial Ergonomics**, 25: 265–274, 2000.

McGORRY, R.W., DEMPSEY, P.G. e O'BRIEN, N. V. The effect of workstation and task variables on forces applied during simulated meat cutting. **Ergonomics**, Vol. 47, Nº 15, 1640–1656, 2004.

MKCONTROLE. Controle e Instrumentação Ltda. **Artigos**. São Paulo – SP, 2015. Disponível em: <http://www.mkcontrole.com.br/artigo_1.html>. Acesso em: 23 agosto 2014.

MORESI, E. A. D. **Metodologia da Pesquisa**. Universidade Católica de Brasília – UCB, 2003. Disponível em: <<http://www.inf.ufes.br/~falbo/files/MetodologiaPesquisaMoresi2003.pdf>>. Acesso em: 20 setembro 2014.

MORO, A. R. P. **O trabalho repetitivo em frigorífico**: utilização da estesiometria da mão como proposta para avaliação dos níveis de LER/DORT nas síndromes compressivas dos membros superiores. Projetos de pesquisa, 2011. Disponível em: <http://buscatextual.cnpq.br/buscatextual/visualizacv.do?metodo=apresentar&id=K4792947D0#PP_O_TRABALHO_REPETITIVO_EM_FRIGORÍFICO:utilização da estesiometria da mão como proposta para avaliação dos níveis de LER/DORT nas síndromes compressivas dos membros superiores>. Acesso em: 23 setembro 2012.

MINISTÉRIO PÚBLICO DO TRABALHO – MPT. **Meio Ambiente do Trabalho** - Adequação das condições de trabalho nos frigoríficos. Ministério Público do Trabalho, 2012. Disponível em: <http://portal.mpt.gov.br/wps/portal/portal_do_mpt/area_de_atuacao/meio_ambiente_do_trabalho/meioambientedotrabalho_programasacoes!/ut/p/c5/04_SB8K8xLLM9MSSzPy8xBz9CP0os3hH92BPJydDRwN_E3cjA88QU1N3L7OgMFNzE6B8JE75UEdTYnQb4ACOBGR0h4Nci1tFkCleeR9nI7zyYNeD5PG4z88jPzdVvyA3NMlg01MXAEMow3k!/dl3/d3/L2dBISEvZ0FBIS9nQSEh/>. Acesso em: 23 setembro 2012.

MUNDIAL SA. **Perfil da Empresa**. Sobre a Mundial. 2011. Disponível em: <<http://mundial-sa.com.br/#/sobre-a-mundial/perfil>>. Acesso em: 18 julho 2015.

MURATA ELECTRONICS OY. **CMA3000-D01** Accelerometers. Datasheet, 2012. Disponível em: <<http://www.murataMEMS.fi/en/products/accelerometers/cma3000-accelerometers>>. Acesso em: 7 outubro 2012.

MURPHY, P., Mc GORRY, R., TEARE, P. e BROGMUS, G. Design and performance of a manual task evaluator. **International Journal of Industrial Ergonomics**, 25: 257–264, 2000.

NATIONAL INSTRUMENTS. **Medindo distensão com Strain Gauges**. Artigos. 2013. Disponível em: <<http://www.ni.com/white-paper/3642/pt/>>. Acesso em: 26 março 2015.

NETTER, F. H. **Atlas de Anatomia Humana**. 2ª ed. Artmed. Porto Alegre – RS, 2000.

National Sanitation Fundation – NSF. **Mission, Values and History**. The Public Health and Safety Organization. 2015. Disponível em: <<http://www.nsf.org/about-nsf/mission-values-history/>>. Acesso em: 04 março 2015.

OLIVEIRA, J. A. V. **Cutelaria Artesanal**. SP, 2012. Disponível em: <http://www.cutelariaartesanal.com.br/downloads/Parte_001.pdf>. Acesso em: 04 março 2014.

OLIVEIRA, S. A **"moderna" indústria brasileira da carne**. Produção à custa da saúde e da vida dos trabalhadores. Instituto Humanitas Unisinos - on line, 2011. Disponível em: <<http://www.ihu.unisinos.br/entrevistas/500466-a-moderna-industria-brasileira-da-carne-producao-a-custa-da-saude-e-da-vida-dos-trabalhadores-entrevista-especial-com-siderlei-de-oliveira>>. Acesso em: 23 setembro 2012.

OLIVEIRA NETO, J. A. O. **Sistema Massa-Mola**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN, 2008. Disponível em:

<<http://docslide.com.br/documents/trabalho-sistema-massa-mola.html>>.

Acesso em: 3 novembro 2014.

PRÄSS, A. R. **A Lei de Hooke**. FÍSICA .NET. 2015. Disponível em:

<http://www.fisica.net/mecanicaclassica/a_lei_de_hooke.pdf>. Acesso

em: 28 dezembro 2015.

PRATES, R. O., BARBOSA, S. D. J. **Avaliação de interfaces de usuário: conceitos e métodos**. In: CONGRESSO DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE COMPUTAÇÃO, 23, 2003, Campinas. Anais... Campinas: SBC, 2003.

RAMOS, E., REIS, D. C., TIRLONI, A. S., MORO, A. R. P. Thermographic analysis of the hands of poultry slaughterhouse workers exposed to artificially cold environment. **Procedia Manufacturing**, 3: 4252 – 4259, 2015.

REILLY, G. A., McCORMACK, B. A. O. e TAYLOR, D. Cutting sharpness measurement: a critical review. **Journal of Materials Processing Technology**, 153–154, 261–267, 2004.

RIOS, L. G., PERRI, E. B. **Engenharia de Antenas**. Edgard Blücher. São Paulo – SP, 1987.

ROSA, R. O. D. e CARDOSO, R. **Sistema de Gestão da Qualidade**. Gravataí – RS, 2010. Disponível em:

<<http://planejamento3p.blogspot.com.br/2009/02/msa.html>>. Acesso

em: 4 novembro 2015.

ROYLANCE, L. M. e ANGELL, J. B. A batch-fabricated silicon accelerometer. **IEEE Transactions on Electron Devices**, v. 26, n. 12, pp. 1911-1917, Dezembro, 1979.

SARDÁ, S. E. **Força Tarefa Nacional** – Projeto Frigoríficos. Ministério Público do Trabalho em Santa Catarina, 2012. Disponível em:

<http://www.prt12.mpt.gov.br/prt/noticias/2012_09/21_09.php>. Acesso

em: 23 setembro 2012.

SCOTT, P. A., RENZ, M. C. A combined field and laboratory investigation for the effective application of ergonomics in situ. **Applied Ergonomics**, 37: 785–792, 2006.

SHENZHEN KWAY COMMERCE CO. **Qi Wireless Charger Charging Pad**. 2015. Disponível em:

<http://www.alibaba.com/product-detail/Qi-Wireless-Charger-Charging-Pad-for_60285212862.html>. Acesso em: 3 dezembro 2015.

SICHUAN JUNHENGTAI ELECTRONIC. **Supply PCB and Coils of QI Wireless Charger Receiver**. 2015. Disponível em:

<http://www.alibaba.com/product-detail/Supply-PCB-and-Coils-of-QI_1690623890.html?spm=a2700.7724857.29.110.ofGcN7>. Acesso em: 3 dezembro 2015.

SILVA, D. C. M. D. "**Centro de gravidade (CG) "**. Brasil Escola. Disponível em: <<http://brasilescola.uol.com.br/fisica/centro-gravidade-cg.htm>>. Acesso em: 4 janeiro 2016.

SILVEIRA, L. S., MERINO, E. A. D., TRIERWEILLER, A. C., de AZEVEDO, B. M. e CRUZ, R. M. **Investigação da usabilidade de faca para desossa de carne bovina**. XXVIII Encontro Nacional de Engenharia de Produção, Rio de Janeiro – RJ, 2008.

SMIT, J. **Rádio Propagação**. 4ª ed. Érica. São Paulo – SP, 1992.

TIMOSHENKO, S. P. **Resistência dos Materiais**. Traduzido da 3ª ed. Volume 2. Editora Livros Técnicos e Científicos. Rio de Janeiro – RJ, 1977.

TIMOSHENKO, S. P. **Resistência dos Materiais**. Traduzido da 3ª ed. Volume 1. Editora Livros Técnicos e Científicos. Rio de Janeiro – RJ, 1978.

TIMOSHENKO, S. P., GERE, J. E. **Mecânica dos Sólidos**. Traduzido da 1ª ed. Volume 1. Editora Livros Técnicos e Científicos. Rio de Janeiro – RJ, 1994.

TIRLONI, A. S., REIS, D. C., SANTOS, J. B., REIS, P. F., BARBOSA, A., MORO, A. R. P. Body discomfort in poultry slaughterhouse workers. **Journal Article - IOS Press**, 2012.

TORMENA JUNIOR, O. **Método de auto-calibração para tríades de sensores utilizadas em aplicações de estimação de atitude**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) -Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2010.

TRAMONTINA. **Institucional**. Carlos Barbosa – RS, 2015. Disponível em: <<http://www.tramontina.com.br/institucional/a-tramontina>>. Acesso em: 16 março 2015.

TRAMONTINA. **Manual Técnico**. Profissional Master. 2014. Disponível em: <<http://www.tramontina.com.br/download-arquivos>>. Acesso em: 27 julho de 2014.

TRIBUNAL REGIONAL DO TRABALHO – 4ª REGIÃO. **P51 – Adicional Faca – Frigorífico**. Precedentes do TRT da 4ª Região, 2009. Porto Alegre – RS. Disponível em: <<http://www.trt4.jus.br/porta/porta/trt4/consultas/jurisprudencia/precedentes>>. Acesso em: 23 setembro 2012.

VIM. **Vocabulário Internacional de Metrologia**: Conceitos fundamentais e gerais e termos associados (VIM 2012). 1a edição luso-brasileira. Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia, JCGM 200, Comitê Conjunto para Guias em Metrologia. Duque de Caxias: RJ, 2012, 94 p.

WADDELL, D. E., WYVILL, C., GREGOR, R. J. Upper extremity kinematics in poultry processing: A comparison between two different cutting tasks. **Journal of Applied Biomechanics**, 19, 168-177. 2003.

WESTGAARD, R. H., WINKEL, J. Ergonomic intervention research for improved musculoskeletal health: a critical review. **International Journal of Industrial Ergonomics**, 20: 463–500, 1997.

WIEDENHOFT, A. G. **Desenvolvimento de uma bancada de teste para torque de parafusos para implantes**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008. Disponível em:

<<http://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/13666/000652105.pdf?sequence=1>>. Acesso em: 24 julho 2014.

ZANOTTA, C. M. Como afiar corretamente suas facas: Os modernos acessórios e as técnicas corretas. **Revista MAGNUM** Ano VIII, Número 47, 1996. Disponível em:

<<http://www.cutelariavirtual.com/afiar/comoafiar.html>>. Acesso em: 1 janeiro 2014.

ZHOU, D. e McMURRAY, G. **Modeling of blade sharpness and compression cut of biomaterials**. *Robótica*, Vol. 28: 311–319, 2010.

ZILIO, S. C., BAGNATO, V. S. **Mecânica, calor e ondas**. 2002. Disponível em:

<<http://www.fisica.net/mecanicaclassica/Mecanica-Calor-Ondas.pdf>>. Acesso em: 15 junho 2015.

ZIVI S/A CUTELARIA. **Manual Técnico para Frigoríficos**. 2001. Disponível em:

<<http://www.segurancaetrabalho.com.br/download/facas-mundial.pdf>>. Acesso em: 28 setembro 2013.

APÊNDICE

Fluxograma de Funcionamento do Firmware

